



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

링크 간 상호관계를 고려한 고속도로
유지보수 사업선정 최적화 연구

**An Optimization of Highway Management
Considering Network Effect between Links**

2017 년 8월

서울대학교 대학원
공과대학 건설환경공학부
민 근 홍

링크 간 상호관계를 고려한 고속도로
유지보수 사업선정 최적화 연구
**An Optimization of Highway Management
Considering Network Effect between Links**

지도교수 고 승 영

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2017 년 5월

서울대학교 대학원
공과대학 건설환경공학부
민 근 홍

민근홍의 박사 학위논문을 인준함
2017 년 6월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

우리나라 고속도로 관리연장 중 노후연장의 비율은 점차 증가하고 있고 이에 따른 필요 예산 역시 증가하고 있으나 필요예산 대비 배정예산의 비율은 점차로 감소하고 있는 실정이다. 따라서 한정된 예산 내에서 경제성을 최대로 보장할 수 있는 최대 편익의 사업을 선정하는 것이 중요하다. 또한, 개별 사업 간의 비교가 아닌 도로 상호 관계를 고려한 네트워크 측면의 분석을 통해 네트워크 총 편익 최대화 방안이 필요하다.

본 논문에서는 대상 사업들 간의 상호관계를 고려한 네트워크 측면의 유지보수 최적화를 수행하고 객관적 지표인 경제성 분석을 적용한 제한된 예산 내에서의 총 편익 최대화 사업 선정을 목적으로 연구를 진행하였다.

기존 한국도로공사 산정식을 이용한 우선순위 방법과 본 연구에서 제시한 개별편익, 지표별 변화량에 따른 우선순위 선정 방안, 네트워크 총 편익의 최대화 방법을 이용하여 각 예산별 선정대안의 편익을 비교 하는 방법을 본 연구에 사용하였다. 도로간 상호관계를 고려한 네트워크 측면의 분석은 한정된 예산 내에서 최대 편익을 산정할 수 있으나 대상사업의 수가 증가할 경우 복잡도의 문제가 발생하여 유전자 알고리즘을 적용한 최적 대안을 선정하는 연구를 진행하였다.

예산별 대안선정 결과 개별편익 방안에 비해 지표별 변화량 방안은 상호관계의 영향으로 인접 혹은 영향을 크게 미치는 링크들이 대상사업으로 선정되고 선정대안의 편익이 높은 것을 확인하였다. 유전자 알고리즘을 통한 최대편익 분석의 경우 가장 높은 편익의 대안을 선정할 수 있는 장점이 있으나 우선순위 방안에 비해 분석시간이 길어 방안별 분석시간의 차이가 있으므로, 현실적 상황에 맞는 방안을 이용하여 대안을 선정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

전국 고속도로 네트워크 분석을 통해 지표별 우선순위 방안과 네트워크 편익 최대화 방안을 제시함으로써 향후 고속도로 유지보수 사업선정을 위한 자료로 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 고속도로 유지보수, 고속도로 포장, 유지보수 우선순위, 편익 최대화, 유전자 알고리즘

학 번 : 2008-21026

목 차

1. 서 론	1
1.1. 연구의 필요성 및 목적	1
1.2. 연구의 범위 및 방법	8
2. 문헌 검토	9
2.1. 현행 도로 유지보수	9
2.2. 우선순위 결정방법	16
2.3. 선행연구	19
2.4. 검토 결과 및 본 연구의 방향성	35
3. 분석방법론	36
3.1. 분석의 개요	36
3.2. 분석의 가정	38
3.3. 고속도로 포장 유지보수 기준	40
3.4. 편익 우선순위 선정	41
3.5. 지표별 우선순위 선정	45
3.6. 네트워크 최대편익 대안 선정	46
3.7. 유전자 알고리즘	47
3.8. 분석 프로세스	55
4. Toy Network 분석	57
4.1. 분석 네트워크	57
4.2. 편익 우선순위 선정	59
4.3. 지표별 우선순위 선정	60
4.4. 네트워크 상태별 분석	63
4.5. 네트워크 최대편익 대안 선정	66
4.6. 예산별 분석	71
4.7. 유전자 알고리즘	75

4.8. 분석결과	78
5. 실제 네트워크 분석	79
5.1. 분석 자료	79
5.2. 항목별 우선순위 선정	81
5.3. 예산별 분석	83
5.4. 분석결과	87
6. 결론 및 향후 연구과제	88
참고문헌	90

표 목 차

[표 II-1] 포장형태별 HPCI 산출식	12
[표 II-2] 아스팔트 포장 HPCI 산정식	12
[표 II-3] 우선순위 평가 산정식	14
[표 II-4] 한국도로공사 유지보수 지표 항목별 산정식	15
[표 II-5] 생애주기비용분석 결과	31
[표 II-6] 유지보수기준 및 비용(2013년 기준)	34
[표 III-1] 가정사항	38
[표 III-2] 도로상태에 따른 용량감소율	38
[표 III-3] 보수공법에 따른 공사단가	39
[표 III-4] 공사규모	39
[표 III-5] 아스팔트 포장 HPCI 산정식	40
[표 III-6] 우선순위 평가 산정식	40
[표 III-7] 도로·철도 부문 사업 시행에 따른 편익항목	43
[표 III-8] 생물학과 유전자 알고리즘 용어 비교	49
[표 III-9] 생물학과 유전자 알고리즘 용어 비교	50
[표 IV-1] Toy Network 분석 O/D	57
[표 IV-2] Toy Network 분석 자료	58
[표 IV-3] 지방부 도로 VDF 파라메타 최적값	58
[표 IV-4] 편익 우선순위 선정결과	59
[표 IV-5] 네트워크 분석 시나리오	63
[표 IV-6] Toy Network 분석 결과	67
[표 IV-7] Toy Network 세분화 분석결과	69
[표 IV-8] Toy Network 세분화 대안선정 결과	70
[표 IV-9] 항목별 우선순위 선정결과	71
[표 IV-10] 예산별 분석결과	72
[표 IV-11] 항목별 분석결과(예산 80억)	73
[표 IV-12] 항목별 분석결과(예산 100억)	74
[표 IV-13] 예산별 유전자 알고리즘 선정 대안	76

[표 V-1] 실제 네트워크 분석 대상사업	79
[표 V-2] 편익 우선순위 선정결과	81
[표 V-3] 항목별 우선순위 선정결과	82
[표 V-4] 예산별 분석결과	84

그 립 목 차

[그림 I-1] 2012년 도로부문 투자예산	2
[그림 I-2] 고속도로 서비스 분야의 중요도 및 포장민원 건수2	
[그림 I-3] 고속도로 노후 포장현황 및 포장보수 예산 배정현황 ..	3
[그림 I-4] 총 보수비용 대비 포장보수 비율	4
[그림 I-5] 아스팔트 포장 손상 유형	4
[그림 I-6] 포장상태에 따른 공용기간	5
[그림 I-7] 포장 생애주기비용	7
[그림 I-8] 고속도로 유지관리체계	7
[그림 I-9] 연구의 방법론	8
[그림 II-1] 현행 도로유지보수 산정식 선정 방식	10
[그림 II-2] 현행 한국도로공사 도로유지보수 진행방식	11
[그림 II-3] 한국도로공사 우선순위 선정 방식	13
[그림 II-4] 다이아몬드 네트워크의 최적 투자 수준	19
[그림 II-5] 다이아몬드 네트워크의 최적 상태	20
[그림 II-6] EOS와 예산 수준에 따른 ADP와 SNO의 비교 ...	22
[그림 II-7] SNO와 TSBU 구현에 따른 시스템 비용	24
[그림 II-8] 예산 수준에 따른 SNO와 ADP의 총 비용 비교 ...	25
[그림 II-9] 유지보수 여부에 따른 이용자 비용 및 편익 변화 ..	26
[그림 II-10] Network-Level 분석을 위한 의사결정시스템	28
[그림 II-11] AHP와 GIS 기반의 도로유지보수 우선순위 ...	29
[그림 II-12] 이용자 비용 및 편익분석 개념(좌)	30
[그림 II-13] 차량속도에 따른 관리자·이용자 비용 개념도 ·	30
[그림 II-14] 수요추정방법/시나리오별 생애주기비용분석 결과 ...	32
[그림 II-15] 공용성 모형을 통한 유지보수 후 예상효과	33
[그림 III-1] 예제 네트워크	36
[그림 III-2] 상호관계 효과 개념도	37
[그림 III-3] 사업대상 선정(예시)	37
[그림 III-4] GA 내 유전자 진화과정	48

[그림 III-5] 본 연구의 GA를 활용한 분석 방법론	54
[그림 III-6] 분석 프로세스	56
[그림 IV-1] 분석 Toy Network	57
[그림 IV-2] 교통량 증가량-편익 분석	60
[그림 IV-3] v/c 증가량-편익 분석	61
[그림 IV-4] 통행시간 변화량-편익 분석	62
[그림 IV-5] 교통량 변화와 편익간의 관계	64
[그림 IV-6] V/C 변화와 편익간의 관계	65
[그림 IV-7] 통행시간 변화와 편익간의 관계	65
[그림 IV-8] Toy Network 세분화	68
[그림 IV-9] 예산별 분석 총괄	72
[그림 IV-10] 유전자 알고리즘 수렴결과	75
[그림 IV-11] 비용-편익 분석결과(전역해)	77
[그림 IV-12] 유전자 알고리즘 선정대안과 전역해 비교	77
[그림 V-1] 분석 대상사업	80
[그림 V-2] 예산별 유전자 알고리즘 분석결과	83
[그림 V-3] 예산별 분석결과	84

1. 서 론

1.1. 연구의 필요성 및 목적

고속도로는 사회기반시설물 중에서 경제·문화를 포함한 사회발전의 중요한 역할을 담당하고 있으며, 매년 고속도로를 이용하는 사용자 또한 지속적으로 증가하고 있다. 고속도로 연장은 1968년 우리나라에서 처음으로 경인고속도로가 개통된 이후 계속적으로 증가되어 왔으며, 매년 새로운 고속도로의 건설과 기존 노선의 확장이 계속되고 있다. 또한 구간별로 노후노선 및 종단·평면 선형의 개량도 꾸준히 시행되고 있다.

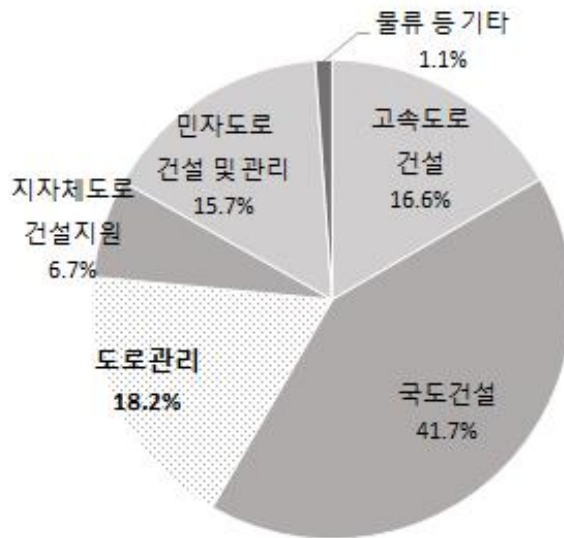
1980년대 후반부터 우리나라는 공용중인 일반국도의 포장을 합리적이고 체계적으로 관리하기 위해 포장관리시스템(PMS: Pavement Management System)을 도입하여 운영하고 있으며, 포장의 질을 최저의 비용을 통해 최적의 상태를 유지하는데 그 목적이 있다(한국건설기술연구원, 2008).

현재 우리나라를 포함한 선진국을 중심으로 포장의 효율적인 관리(유지보수 포함)를 위해 생애주기비용분석(LCCA)등 경제성과 안전성을 고려하여 계획에서 유지보수, 폐기에 이르기까지 전 과정의 종합적 관리에 많은 연구와 노력을 하고 있다.

우리나라의 도로 연장 및 우리나라의 도로 연장 및 포장율은 계속 증가 추세에 있으나 차량통행 및 환경에 따른 파손과 노후노선 증가 등으로 인하여 유지보수의 필요성이 증대되고 있다. 우리나라의 2012년 유지보수 예산은 총 도로투자액의 13% 수준으로 유지보수에 대한 투자가 필요한 실정이다.

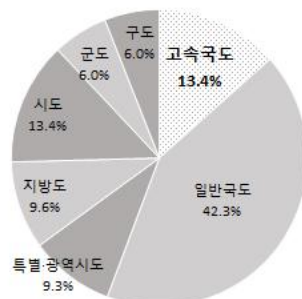
경제적으로 한정된 재원을 가지고 효율적인 유지관리를 통하여 경제적인 손실을 막아야 한다. 적절한 시기, 적절한 방법, 우선구간의 선정을 통한 유지관리의 부재는 도로의 노후를 촉진시킴으로써 불필요한 재원의 낭비를 초래하게 된다. 또한 도로의 교통량의 특성 등을 고려한 합리적

인 도로 유지관리는 도로를 경제적이고 효율적으로 사용 할 수 있도록 한다.

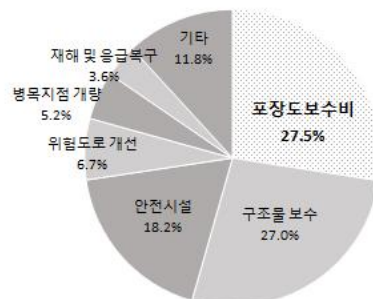


[그림 1-1] 2012년 도로부문 투자예산

고속도로의 서비스 분야 중 노면상태의 비중이 가장 높고 고속도로 유지관리 전체 민원 대비 포장민원건수는 많은 비중을 차지하고 있으며, 계속적으로 증가되는 추세이다. 이는 한정된 고속도로유지보수 예산으로 적절한 보수시기 지연 및 미보수가 원인이다.



<도로등급별 보수비>

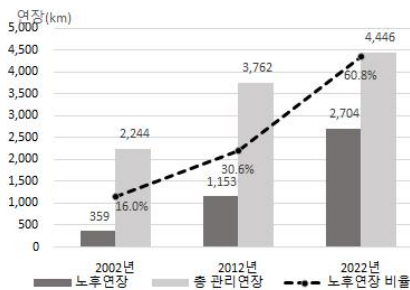


<보수공종별 보수비>

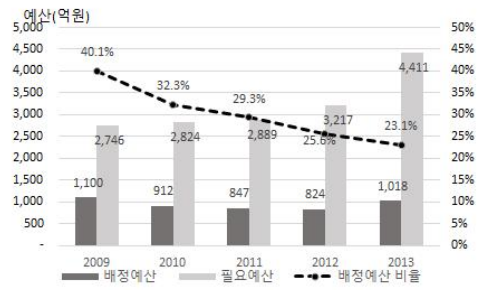
[그림 1-2] 고속도로 서비스 분야의 중요도 및 포장민원 건수

고속도로 관리연장의 증가와 더불어 노후구간의 연장도 증가하고 있으며, 현재에도 계속 공사 중인 신설 노선을 감안하면 2022년에 134.5%가 증가될 전망이다.

현재, 고속도로 포장보수의 예산 매우 부족한 실정이다. 따라서, 사업대상 우선순위를 선정 최적화를 통한 최소 비용의 최대 서비스 제공이 필요하다.



<고속도로의 노후포장 증가 현황>

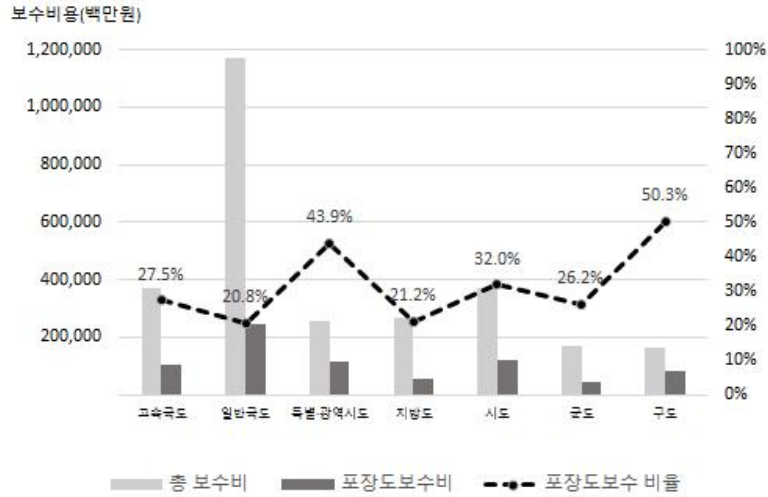


<고속도로 포장보수 예산 배정현황>

[그림 1-3] 고속도로 노후 포장현황 및 포장보수 예산 배정현황

현재 고속도로 관리는 포장관리시스템(HPMS)를 도입하여 포장상태 조사 및 분석, 포장상태 평가, 포장상태 예측, 사업대상구간 선정, 사업우선순위 결정, 사업시행 순으로 운영 중에 있다. 유지관리 대상구간으로 선정된 구간을 모두 일시에 관리하기 위해서는 많은 예산이 소모되기 때문에 대상구간들의 우선순위 선정하여 예산을 효율적으로 사용하여야 한다. 현재 적용되는 우선순위 선정방법은 개량사업효과지수를 통한 방법이다. 현재의 방법은 교통량, 공용성 지수, 보수연장을 고려하여 우선순위를 선정하는 방법이다. 포장상태 지수의 변화를 계산하여 개량효과지수가 큰 구간에 높은 순위를 부여하는 방식으로 우선순위를 선정하였다.

도로는 시간에 따라 급속도로 노후되며, 이에 따른 유지보수 비용이 증가하게 되므로 사회적·경제적 편익을 위하여 최적의 유지보수 전략이 필요하다.



[그림 1-4] 총 보수비용 대비 포장보수 비율

총 보수비 대비 포장도 보수비 비율은 도로 등급별 평균 27.5%이며, 고속도로의 포장도 보수비는 1,023억으로 고속도로 보수비용의 27.5%를 차지하고 있다.



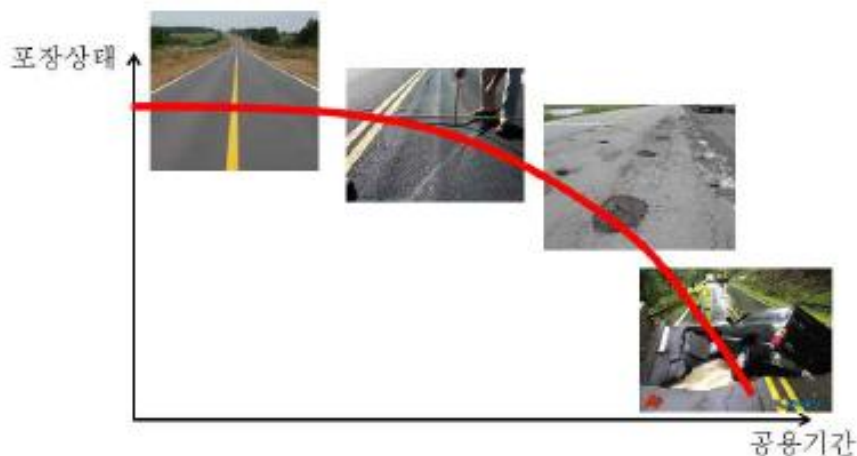
[그림 1-5] 아스팔트 포장 손상 유형

아스팔트 포장에 발생하는 대표적인 손상으로는 [그림 1-5]와 같이 균열(Crack), 포트홀(Pothole), 표면변형(Surface deformation), 표면손상

(Surface defect) 등이 있다.

균열은 발생 원인과 형상에 따라 피로(Fatigue) 균열, 블록(Block) 균열, 종방향(Longitudinal) 균열, 반사(Reflection) 균열, 횡방향(Transverse) 균열로 분류할 수 있다.

표면변형은 바퀴패임에 의한 소성변형(Rutting)과 밀림(Shoving)이 있다. 표면손상으로는 아스팔트 바인더가 표면에 번지는 블리딩(Bleeding), 골재가 떨어져 손실되실 골재박리(Raveling), 골재가 닳는 골재마모(Polished aggregate)가 있다. 이 중 포장체의 구조적인 문제와 관계가 있는 손상으로는 균열, 소성변형이 있고, 나머지는 기능적 문제와 관계있다.



[그림 1-6] 포장상태에 따른 공용기간

아스팔트 포장에 발생하는 손상은 공용 초기에는 천천히 진행되나 공용기간 또는 누적 차량통행량이 증가할수록 [그림 1-6]과 같이 포장상태가 급속하게 나빠지게 된다. 따라서 공용기간 중 일정수준 이상의 성능을 확보하기 위해서는 적절한 설계를 통한 단면을 확보할 뿐만 아니라, 적기 적소에 적절한 유지보수를 실시하는 것이 중요하다.

도로포장은 적절한 유지관리를 통하여 40~50년 이상 사용이 가능하다. 포장의 공용성능은 크게 구조적, 기능적 성능으로 나타낼 수 있다. 구조

적 성능은 차량 및 환경 하중에 대한 충분한 지지력을 가지고 있는지에 대한 것이고, 기능적 성능은 쾌적하고 안전한 운전환경에 관한 것이다.

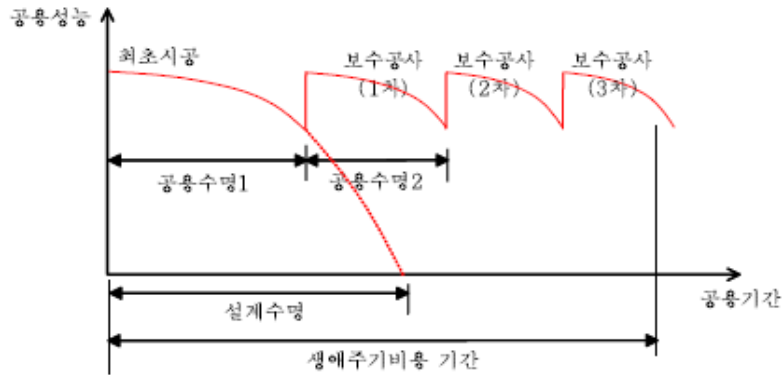
두 기능이 모두 일정한 상태로 유지가 되어야 도로포장의 기능을 원활하게 수행한다고 할 수 있다.

만일 포장상태가 불량하여 구조적, 기능적 공용성능을 적절하게 발휘하지 못할 경우 공용성능 향상을 위하여 보수가 필요하다.

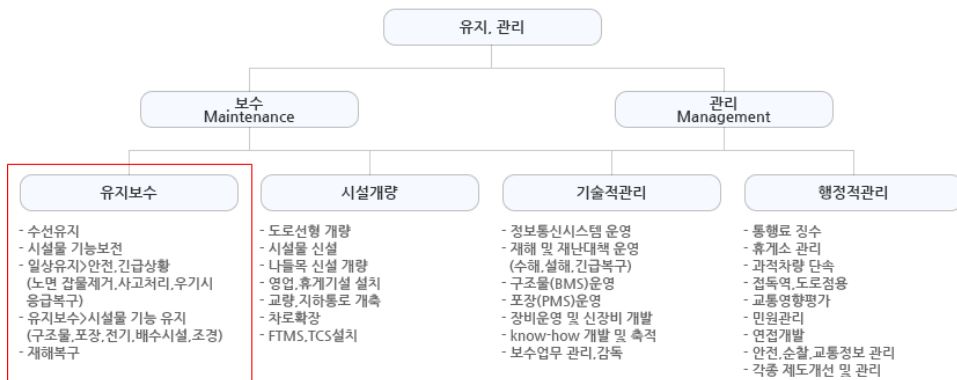
도로포장에 적용되는 유지보수 방법은 크게 예방적 유지보수, 일상 유지보수, 긴급 유지보수로 구별할 수 있다(국토교통부, 2013). 예방적 유지보수는 초기 발생한 미소한 균열 또는 표면 파손을 보수하는 것으로 예방적 유지보수를 적절히 적용하면 포장의 수명을 향상시킬 수 있다. 대표적인 예방적 유지보수로는 슬러리실(Slurry seal), 마이크로서페이싱(Micro-surfacing)과 같은 표면처리공법이 적용되고 있다. 일상 유지보수는 포장에 균열, 소성변형, 라벨링 등 심각한 수준의결함이 발생하여 구조적, 기능적 공용성이 불량한 경우에 실시한다. 대표적인 일상 보수공법으로 아스팔트 덧씌우기 공법이 있다. 긴급 유지보수는 블로우업(Blow-up), 심각한 포트홀, 도로함몰(일명 싱크홀) 등으로 인해 도로 이용자의 안전에 문제가 있을 경우 영구적인 보수를 실시하기 이전에 긴급하게 보수하는 것이다. 이러한 유지보수 공법을 적절하게 적용하기 위해서는 포장상태를 주기적으로 점검하고, 포장상태에 적합한 보수 공법을 선정하는 것이 중요하다. 따라서 일반국도 및 고속국도, 시도도로 등을 관리하는 기관에서는 포장상태에 따른 적절한 보수 시기 및 공법을 선정하기 위하여 PMS를 운영하고 있다.

포장의 공용수명이란 준공이후 포장의 상태가 매우 불량해져서 구조적인 성능 향상을 위하여 덧씌우기 또는 재포장과 같은 보수를 실시할 때까지의 공용기간을 의미한다. 일반적으로 주요도로의 도로포장 상태가 재포장이 필요한 수준까지 떨어지는 경우는 없으므로 실질적인 포장의 공용수명이란 준공 후 첫 번째 덧씌우기 보수까지의 공용기간 또는 이후 덧씌우기 보수주기를 의미한다.

포장상태에 따라 보수공법의 적용시기 및 공법이 달라지므로, 보수시기를 결정하는 임계 포장상태에 따라서도 공용수명이 달라진다.



[그림 1-7] 포장 생애주기비용



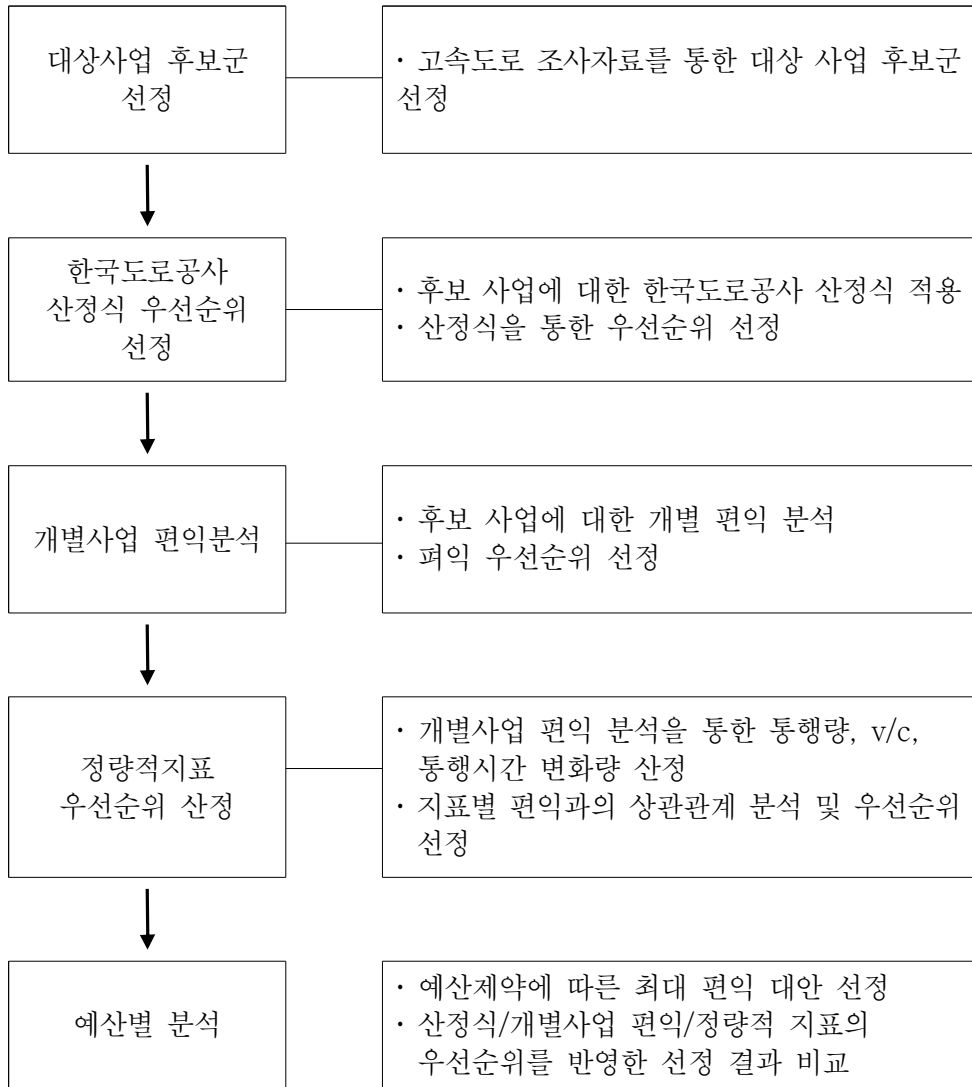
[그림 1-8] 고속도로 유지관리체계

도로 연장 증가와 파손에 따른 노후노선 증가에 따라 유지보수 사업에 따른 예산이 부족한 상황이며, 제한된 예산 내에서의 효과를 극대화할 수 있는 우선순위 사업 선정이 필요한 실정이다.

따라서, 개별 사업간의 비교가 아닌 도로 상호 관계를 고려한 네트워크 측면의 분석을 통해 네트워크 총 편익 최대화 방안이 필요하다.

대상 사업들 간의 상호관계를 고려한 네트워크 측면의 유지보수 최적화를 수행하고 객관적 지표인 경제성 분석을 적용한 제한된 예산 내에서의 총 편익 최대화 사업 선정을 목적으로 연구를 진행한다.

1.2. 연구의 범위 및 방법



[그림 1-9] 연구의 방법론

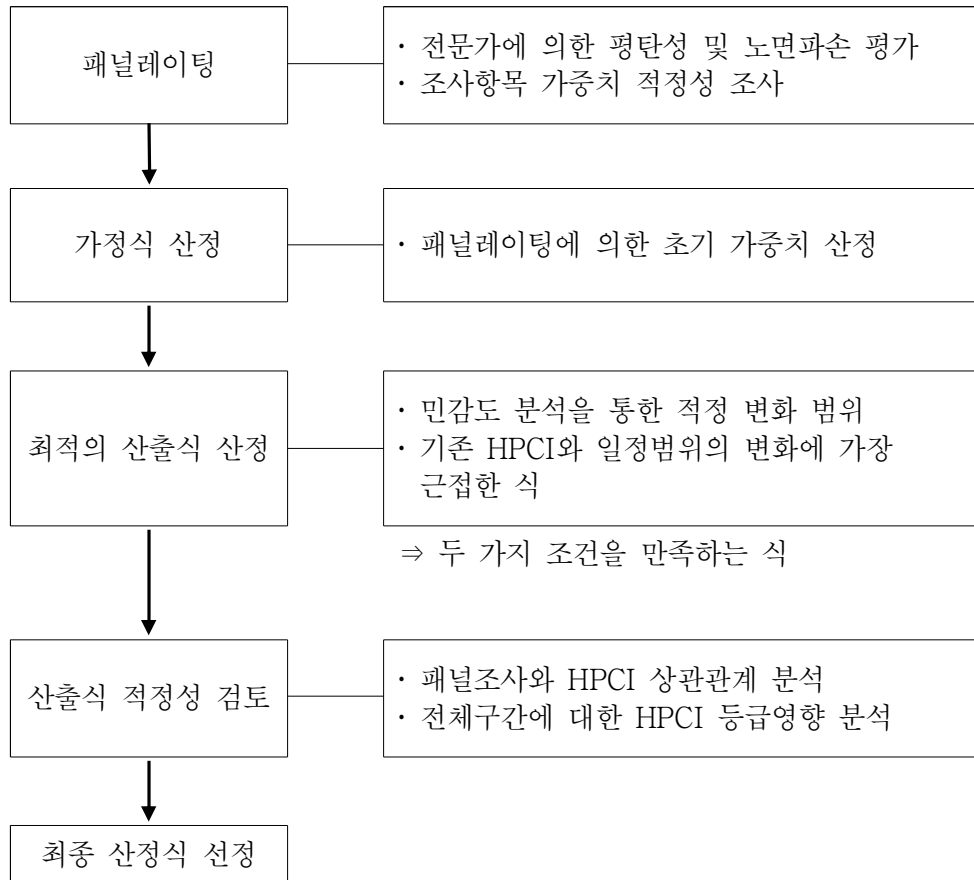
2. 문헌 검토

2.1. 현행 도로 유지보수

2.1.1. 사업대상구간 선정

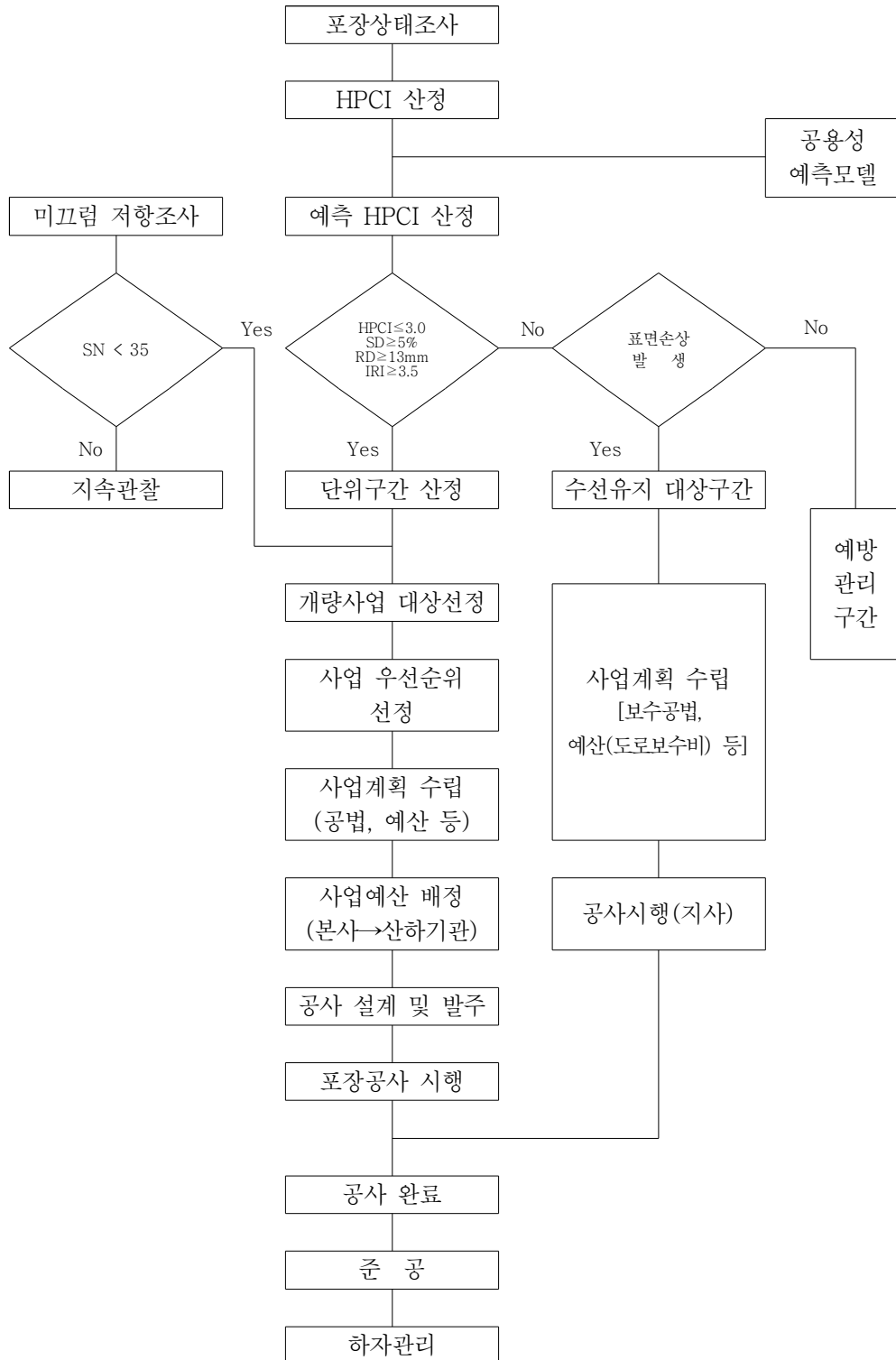
사회기반시설의 유지관리를 위한 운영체계는 선진국을 중심으로 이미 개발되어 운영 중에 있는 사례가 많이 있으나, 아직 본격적인 국가 차원의 유지관리를 위한 의사결정에는 큰 영향을 미치지 못하고 각 시설물(도로포장, 교량 등)을 대상으로 한 투자분석, 리스크분석 등을 중심으로 의사결정을 지원하는 시스템 운영에 머물고 있는 실정이다.

한국도로공사에서는 고속도로 포장상태 평가지수인 HPCI(Highway Pavement Condition Index)는 1996년도에 최초 개발되었으며, 과거 AASHO 도로시험시 산출되었던 PSI와 유사한 방법으로 도출되었다. HPCI는 일정한 대표구간 및 평가위원을 미리 선정한 후 평가위원들이 각 구간을 실제로 주행하여 주관적으로 판단한 평가치인 PSR과 장비를 통해 측정된 손상항목들(평탄성, 표면손상, 소성변형량)간의 상관관계를 일정한 기준에 의하여 회귀 분석하는 방식으로 산정되었다. 이후 포장장비 성능 및 기술발전으로 인한 평탄성 향상과 콘크리트 포장의 노후화로 인한 파손이 급격히 증가하고 있는 현장여건을 반영하기 위해 다음과 같이 2004년 1차 개정과 2006년 2차 개정을 거쳐 2011년 3차 개정을 통해 고속도로의 시공상태, 교통여건 등을 감안하여 현장과 부합되는 포장상태지수를 도출하였다. 이러한 포장상태지수 개정은 1차적으로 패넬레이팅을 실시하는데 이는 포장관리자 및 전문가를 대상으로 동일한 조사대상에 대하여 동일질문을 반복 실시하는 방법으로써, 3차 개정을 위하여 한국도로공사 60여명을 대상으로 노면손상, 평탄성 조사 및 평가, 조사항목별 포장상태에 미치는 가중치에 대한 조사를 실시하였다. 이를 바탕으로 가정식을 산정하여 민감도 분석 등을 통한 최적 산출식을 산정한다.



[그림 II-1] 현행 도로유지보수 산정식 선정 방식

고속도로의 포장유지관리를 위해서는 정부로 부터 예산을 배정받아야 하며, 예산을 배정받기 위해서는 공용중인 전 노선의 포장상태에 대하여 공학적이고 기술적인 조사가 선행되어야 한다. 이러한 전 노선에 대한 포장조사는 다음연도 사업계획을 반영받기 위하여 전년도에 실시하여 승인요청을 하게 된다. 그리고 전년도에 요청하여 반영된 예산으로 당해 연도 포장유지 사업을 시행하게 된다.



[그림 Ⅱ-2] 현행 한국도로공사 도로유지보수 진행방식

[표 II-1] 포장형태별 HPCI 산출식

포장형식	산출식
아스팔트 포장	$HPCI = 5 - 0.54 \times IRI^{0.8} - 0.75 \times RD^{1.2} - 0.9 \times \log(1 + SD)$ <ul style="list-style-type: none"> • IRI(International Roughness Index): 국제 평탄성지수(m/km) • RD(Rut depth): 차바퀴패임량(cm) • SD(Surface Distress): 노면손상 환산면적(m²)
콘크리트 포장	$HPCI = 5 - 0.8 \times IRI^{0.7} - 0.85 \times \log(1 + 2.5 \times SD)$ <ul style="list-style-type: none"> • IRI(International Roughness Index): 국제 평탄성지수(m/km) • SD(Surface Distress): 노면손상 환산면적(m²)

산출된 HPCI등급에 대한 대응책은 예방적 보수의 경우 점검을 통해 수선유지 필요성을 판단하여 조치를 취한다. 수선유지의 경우 파손 초기에 소규모 보수로 파손부가 발전되지 않도록 보수하며, 개량의 경우 준공당시 상태로 기능을 회복되도록 보수 및 보강을 한다.

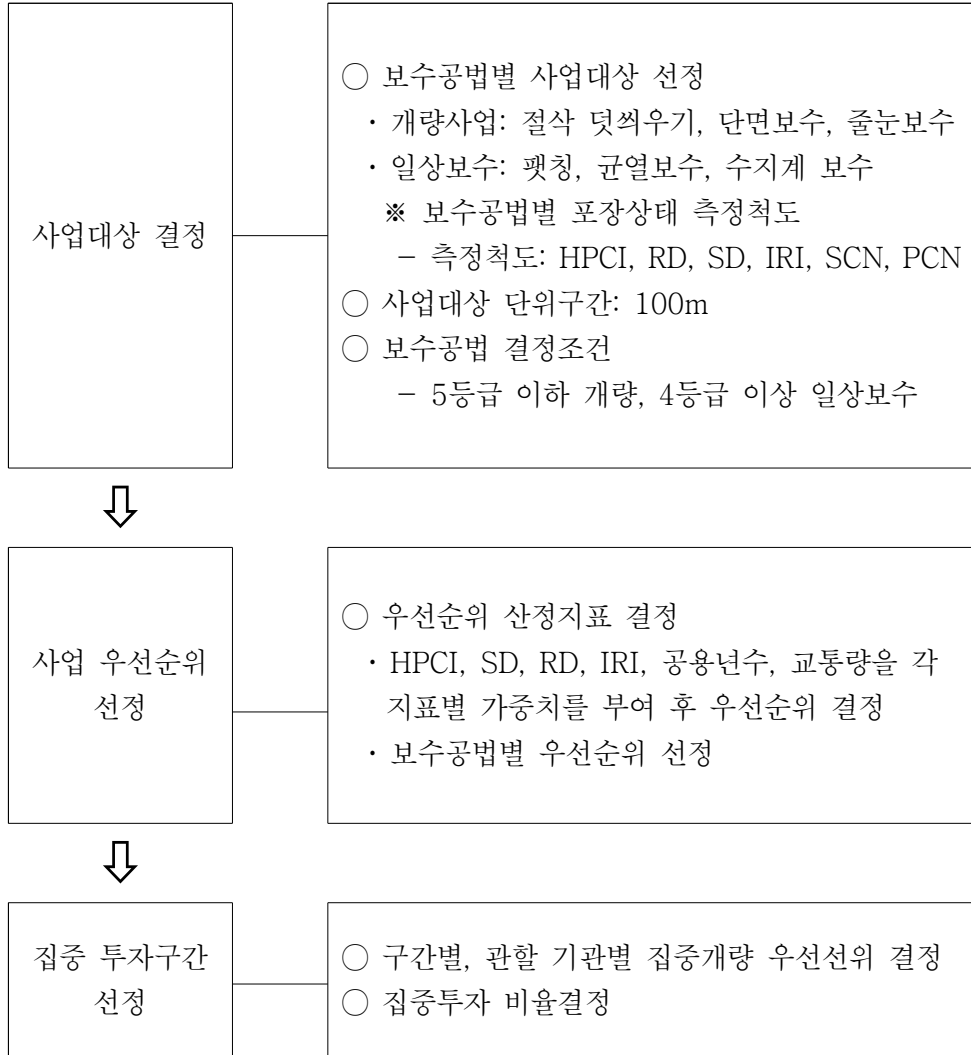
[표 II-2] 아스팔트 포장 HPCI 산정식

등급	HPCI 범위	상태	대응책
1등급	4.0 초과	매우 우수	보수 불필요
2등급	3.5~4.0	우수	예방적 보수
3등급	3.25~3.5	다소 우수	필요시 수선유지
4등급	3.25~3.5	보통	수선 유지
5등급	2.5~3.0	다소 불량	필요시 개량
6등급	2.0~2.5	불량	개량
7등급	2.0 이하	매우 불량	우선 개량

출처: 한국도로공사, “포장 관리 및 유지보수 실무 편람”, 2012

2.1.2. 우선순위 절차 프로세스

포장 유지보수 사업대상 선정을 위한 우선순위 절차 프로세스는 다음과 같다.



[그림 II-3] 한국도로공사 우선순위 선정 방식

아스팔트 포장 유지보수 공법 선정을 위한 프로세스는 HPCI, SD, RD, IRI의 값에 따라 결정되어 일상보수, 전면 절삭 덧씌우기 및 부분 절삭 덧씌우기 공법으로 결정된다.

콘크리트 포장 유지보수 공법 선정을 위한 프로세스는 HPCI, SD, RD, IRI의 값에 따라 결정되어 일상보수, 전면 절삭 덧씌우기, 부분 절삭 덧씌우기 공법, 평탄성 회복 및 단면보수 공법으로 결정된다.

포장유지보수 사업 우선순위 결정방법에는 절삭 덧씌우기 및 단면보수와 줄눈보수로 나누어진다. 먼저 절삭 덧씌우기 및 단면보수 사업 우선순위 결정시 포장 구간의 HPCI, SD, RD, IRI, 공용년수, 교통량의 값을도출하여 표 3-6과 같이 보수공법별(100m구간) 점수산정을 통해 선정한다.

[표 II-3] 우선순위 평가 산정식

산정식	비고
$HPCI + SD + RD(\text{아스팔트}) + IRI + \text{공용년수} + \text{교통량}$	1,000점 기준

출처: 한국도로공사, “포장 관리 및 유지보수 실무 편람”, 2012

보수공법별 점수산정 값은 합산값을 산정하여 높은 점수별 우선순위를 부여하고 노선별, 구간별 점수를 합산 후 우선순위를 선정한다. 이때 아스팔트 및 콘크리트 포장의 다른 가중치는 다음과 같이 고려하여 산정한다.

[표 II-4] 한국도로공사 유지보수 지표 항목별 산정식

항목	산정식
HPCI	$\left \frac{HPCI_{\max} - HPCI(\text{측정구간})}{HPCI_{\max} - HPCI_{\min}} \right \times 300$
SD	$\left \frac{SD_{\min} - SD(\text{측정구간})}{SD_{\min} - SD_{\max}} \right \times 200$
RD	$\left \frac{RD_{\min} - RD(\text{측정구간})}{RD_{\min} - RD_{\max}} \right \times 150$
IRI	$\left \frac{IRI_{\min} - IRI(\text{측정구간})}{IRI_{\min} - IRI_{\max}} \right \times 150$
공용년수	$\left \frac{\text{공용년수}_{\min} - \text{공용년수}(\text{측정구간})}{\text{공용년수}_{\min} - \text{공용년수}_{\max}} \right \times 50 + 50$
교통량	$\left \frac{\text{교통량}_{\min} - \text{교통량}(\text{측정구간})}{\text{교통량}_{\min} - \text{교통량}_{\max}} \right \times 50 + 50$

※ 참고

- HPCI(Highway Pavement Condition Index)
 - HPCI max: 항목별 최고점의 포장상태지수 값
 - HPCI min: 항목별 최저점의 포장상태지수 값
 - HPCI (해당구간): 측정구간의 포장상태지수 값
- SD(Surface Distress)
- RD(Rut depth)
- IRI(international Roughness Index)
- 교통량(AADT)

2.2. 우선순위 결정방법²⁸⁾

포장유지관리를 위해 적용할 수 있는 우선순위 결정 방법에는 크게 Ranking Method와 최적화에 의한 방법으로 구분할 수 있다. 이 밖에 AHP(계층화 분석 기법)를 이용한 우선순위 결정법, DecisionTree에 우선순위 결정법, 결정도표를 이용한 방법이 있다.

2.2.1. Ranking Method

우선순위를 정하기 위하여 정해진 기준에 따라서 순위를 결정하는 방법이다

1) 손상정도를 고려한 우선순위 방법

소성변형 발생량, 균열 발생면적, 평탄성 등 각각의 손상의 발생을 고려하여 순위를 정하는 방법이다. 이 방법을 적용하게 되면 다른 것을 고려하지 않고 손상정도가 큰 구간을 먼저 보수하게 되어 한정된 자원을 효율적으로 배분하지 못하는 문제점을 가지고 있다.

2) 포장상태(Condition Rating) 평가지수에 의한 우선순위 부여

포장평가지수 PSI, PCI, HPCI등과 같이 포장의 공용성능을 나타내는 지표를 이용하여 우선순위를 정하는 방법이다. 이 방법은 손상정도를 고려한 우선순위 방법과 동일한 문제점을 가지고 있다.

3) 다기준분석에 의한 우선 순위 부여

이 방법은 PSI, PCI, HPCI와 같이 포장의 기능적 공용성능에 중점을 둔 평가지수이외에 구조적 성능에 의한 지수, 안전성과 관련된 지수 등을 별도로 산정하여 이러한 다양한 지수를 복합적으로 고려하여 우선 순위를 부여하는 방법이다. 이때 각각의 지수는 중요도를 감안하여 가중치를 부여를 통하여서 동일하게 정의되어야 한다.

4) 초기 시공비용에 따른 우선 순위 부여

이 방법은 가장 초기 시공비용이 적은 구간부터 보수를 하는 방법이다. 이 방법은 각 구간별 보수 대안이 확정된 상태에서는 적용이 가능하지만, 관리자비용만을 고려하고 사용자의 비용이나 편익을 고려하지 않

는 한계가 있다.

5) 최소 수명주기비용에 의한 우선순위 부여

포장의 공용기간동안 관리자가 부담하는 모든 비용을 고려하며, 해석기간 동안 일정한 공용수준을 확보하기 위한 비용을 정량화한 후 이 비용에 따라 우선순위를 부여하는 방법이다. 이때 각 구간의 수명, 해석기간 중 적용하게 되는 보수공법의 수명을 예측하기 위하여 공용성 모형을 사용한다.

6) 비용-편익비, 비용효과분석에 의한 우선순위 부여

비용-편익비(Benefit-costRatio)에 의한 방법은 해석기간 동안 발생하는 비용과 편익을 산정하여 B/C의 비율에 따라서 우선순위를 선정하는 방법이다. 비용 및 편익은 사용자와 관리자에게 발생하는 모든 경우를 고려하게 되며, 비용의 경우 초기시공비용, 유지관리비용, 차량운행 비용, 차량지체 비용, 사고로 인한 비용, 환경오염에 의한 비용 등이 해당되고 편익의 경우 이러한 비용이 감소되는 측면에서 파악되어야 한다.

비용효과분석(Cost-EffectivenessAnalysis)에 의한 방법은 비용편익비와 유사한 개념이지만 편익을 화폐단위로 정량화 하지 않고 공용성 모형 그래프의 면적으로 편익을 나타내는 방법과 같이 다른 대체 수단에 의해 나타내는 방법이 주로 사용된다.

2.2.2. 최적화(Optimization)에 의한 방법

최적화는 편익을 최대화 하거나,비용을 최소화하는 것이다. 이러한 방법은 이러한 목표들을 하나의 목적함수로 모형화하게 된다. 각 구간별 공법선정과 동시에 여러 대안을 비교하여 목적함수를 최대로 하는 대안을 선정하게 된다.

2.2.3. AHP(계층화 분석 기법)를 이용한 우선순위 결정법

AHP는 의사결정의 목표,또는 평가의 기준이 많고 복합적인 경우 상호 배반적인 대안들의 체계적인 평가를 지원하는 의사결정지원기법의 하

나로써 정성적용소를 포함하는 다기준 의사결정에 널리 사용되어 왔다. 도로 유지관리부문에서 우선순위 결정방법은 파손상태 분석, 파손영향 요소 파악, 평가지표 설정 후 가중치를 고려하여 종합 점수를 산출 하여 우선순위를 결정하는 순서로 진행된다.

2.2.4. Decision Tree에 우선순위 결정법

DecisionTree란 여러 가지 분류 조건등을 통해서 나타난 결과를 분류 하여 우선순위를 정하는 방법이다.포장상태를 나타낼 수 있는 여러 가지 조건을 분류하여 보수 우선순위를 정하는 방법이다.

2.2.5. 결정도표를 이용한 방법

조사를 통해 얻어진 Dataset을 100m단위의 대표값을 사용하고, 보수 우선순위와 보수공법의 결정은 포장상태지표(HPCI,IRI)를 이용한 결정도표를 이용하여 우선순위를 선정한다.

결정도표를 이용한 방법은 다음과 같은 문제를 가지고 있다.

- 우선순위 결정에 있어서 정치적인 요구를 반영하기 어렵다
- 국부적인 침하나 포트홀과 같은 결함은 결정도표에서 고려하지 않기 때문에 무시될 수 있다.

2.2.6. 수명주기를 고려한 개량사업

수명주기를 고려하여 개량사업효과를 산출,개량 목표연도 전까지 포장 수명 상태를 예측하고,개량후의 포장수명을 고려 하여 전체 생애주기 동안의 사업효과를 산출하는 방법이다.

2.3. 선행연구

Durango-Cohen & Sarutipand (2007)는 다기능 수송 인프라 시스템 (multifacility transportation infrastructure systems)에 대한 최적의 유지 보수 및 수리 정책을 구하는 문제에 대해 2차 프로그래밍 공식 (quadratic programming formulation)을 제시하였으며, 제시된 모형은 시스템을 구성하는 시설을 연결하는 경제적 상호 의존성을 고려하면서 의사 결정을 지원하기 위한 계산이 쉬운 틀을 제시하였다.

최적의 유지 보수 및 수리 정책을 얻기 위한 문제는 아래 식과 같은 모형으로 표현할 수 있다.

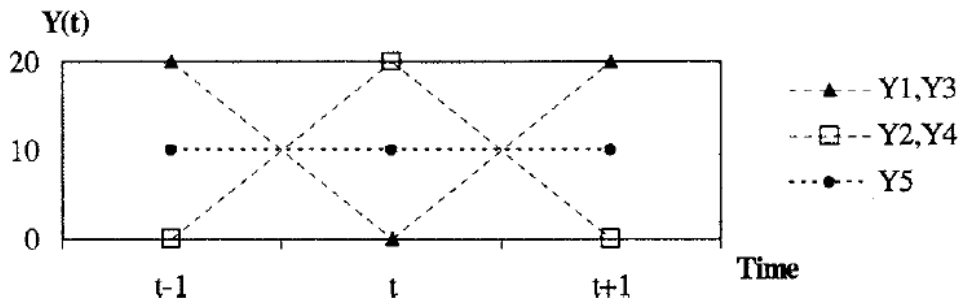
$$\min \sum_{t=1}^T \delta^{t-1} p(X_t, Y_t) + \delta^T s(X_{T+1})$$

$$s.t. X_{t+1} = g'X_t + h'Y_t + k$$

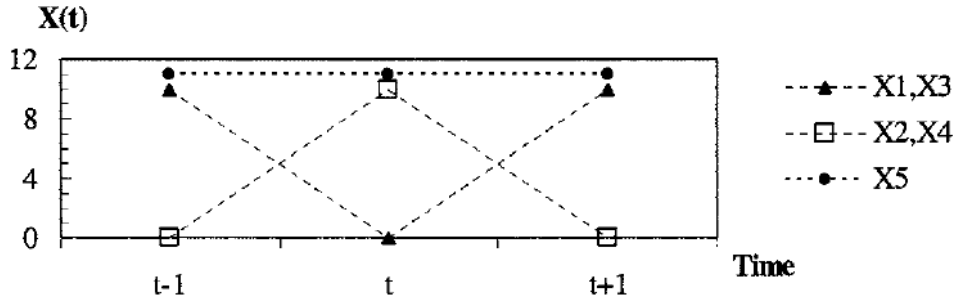
$$X_1 = \hat{X}_1$$

$$Y_t \geq 0$$

이들은 제안된 모형의 장점을 입증하기 위해, 자원 및 인력 공급과 관련된 비용을 줄이기 위해 인접 설비의 조정 일정을 조정하는 것과 관련된 이점뿐만 아니라 처리량의 혼란 및 손실과 관련된 비용을 반영하는 경제적 상호 의존성을 포착하는 수치 사례를 제시하였다.



[그림 11-4] 다이아몬드 네트워크의 최적 투자 수준



[그림 II-5] 다이아몬드 네트워크의 최적 상태

Durango-Cohen & Sarutipand (2009)는 Durango-Cohen & Sarutipand (2007)의 연구에 이어 다기능 수송 인프라 시스템 (multifacility transportation infrastructure systems)에 대한 최적의 유지 보수 및 수리 정책을 구하는 문제에 대해 2차 프로그래밍 공식 (quadratic programming formulation)을 제시하였다. 이 공식에서, 각 설비의 악화 및 수요는 선형 시스템, 즉 외인성 입력 모형을 갖는 자기 회귀 이동 평균 모형 (autoregressive moving average model with exogenous inputs model, ARMAX)로 식별되고 표현된다. 이 모형은 수요와 악화 사이의 양방향 관계를 명시 적으로 포착한다. 즉, 시설의 상태는 수요 및 교통량에 영향을 주며, 이는 차례로 시설이 악화되는 속도를 결정한다. 시설의 상태가 다른 시설의 수요에 영향을 줄 수 있기 때문에 시스템을 구성하는 요소가 서로 연결된다. 이러한 관계는 수요의 교차 탄력성 명세에 의해 발견된다. 2차 목적식은 비용 측면에서 비선형성을 포착하는 데 사용될 수 있다. 예를 들어 정채, 차량 마모 및 유지 보수 활동의 규모와 관련된 비용을 반영 할 수 있다.

Medury (2013)는 마르코프 결정 프로세스 (Markov Decision Process, MDP) 기반의 시스템 수준의 MR & R (maintenance, rehabilitation and replacement) 의사 결정 프레임워크 개발에 초점을 두고, 수정 된 MDP 기반 최적화 프레임 워크를 예산 할당 문제를 해결하기 위해 제안하였다. 동시 네트워크 최적화 (simultaneous network optimization, SNO)라

고 하는 이 프레임 워크는 인프라 관리 문헌에서 다양한 MDP 기반 최적화 접근법의 두드러진 특징을 결합하고 예산 할당 문제에 대해 최적의 시설 특정 MR & R 정책을 제공한다. 이 연구에서 제안된 방법론은 다양한 시스템 크기를 포함하는 파라메트릭 연구를 사용한다는 점에서 다른 최첨단 MDP 방법론과 차이점을 갖는다.

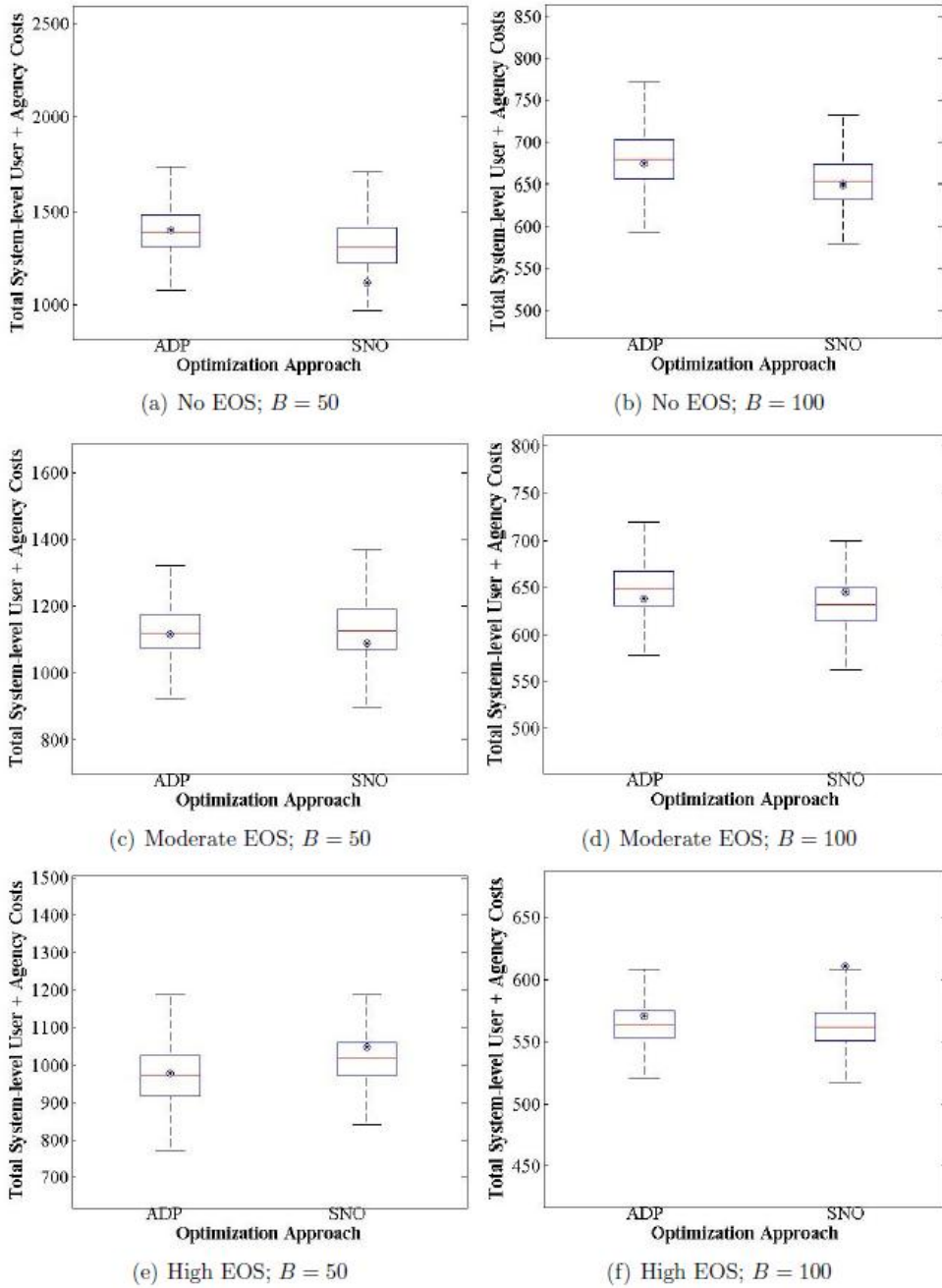
또한 이 연구에서는 네트워크 제약과 관련된 시스템 수준의 MR & R 의사 결정 문제를 해결하기 위해 근사 동적 프로그래밍 (approximated dynamic programming, ADP) 프레임 워크를 사용한다. ADP는 전통적인 동적 프로그래밍 프레임워크와 관련된 차원의 저주(curse of dimensionality)를 극복함으로써 복잡한 문제 공식의 모델링을 용이하게 한다.

시스템 수준의 인프라 관리를 위한 ADP의 적합성을 평가하기 위해 네트워크 고려 사항과 관련된 두 가지 시나리오를 통해 연구를 수행하였다. 첫 번째 시나리오에서는 건설 활동으로 인한 용량 손실이 agency defined 네트워크 용량 임계 값을 받는 ADP 프레임 워크를 제안한다. 매개 변수 연구는 의사 결정 과정에 기반한 네트워크 기반 구속 조건의 영향을 추론하기 위해 양식화된 네트워크 구성에 대해 수행된다. 결과는 네트워크 용량 제약 조건이 의사 결정 과정에 구속될 때 ADP가 SNO보다 더 잘 수행한다는 것을 보여 준다.

두 번째 시나리오에서는 예산 배분 문제 내에서 규모의 경제 (EOS) 도입의 영향을 조사한다. 여기서, 네트워크 고려 사항을 통합하는 것은 경제적 상호 의존성을 유도하는데, 이는 인접 도로 구간 전체에 걸쳐 MR & R 및 R&D 활동을 결합하여 달성할 수 있다. 매개 변수화 된 사례 연구를 사용하면 ADP와 SNO의 성능이 비슷하며 ADP는 저비용 및 높은 EOS 설정에서 SNO의 결과를 향상시킨다.

다른 연구들에서는 시스템 수준의 예산 할당 문제를 해결하는 데 ADP를 사용하는 방법을 보여 주었지만 ADP는 복잡한 시설 간 역학 관계와 관련된 모델링 문제와 더 관련이 있다. 특히 ADP는 분석 프레임

워크를 사용하여 최적의 정책을 찾는 것이 실현 가능하지 않은 시나리오에서 가장 유용하다는 것을 보여주었다.



[그림 II-6] EOS와 예산 수준에 따른 ADP와 SNO의 비교

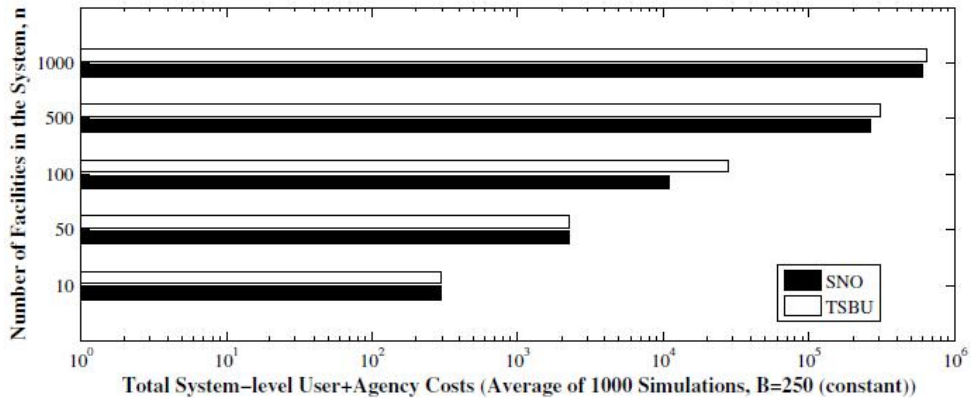
Panda (2013)는 도로의 유지보수 정책 개발의 어려움을 해결하기 위

하여 새로운 개념과 분석적 접근방식을 도입하였으며, 도로 유지보수와 관련된 모든 필요요소와 요인들을 충분히 고려하여 총 비용을 최소화하고 총 수익을 증가시키는 다목적 최적화 모델(multi-objective optimization model)을 수립하였다.

비지배적 구분 유전자 알고리즘 II(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)기반 C프로그래밍이 개발된 모델을 검증하는데 사용되었다. 제안된 최적화 모델은 실시간 현장 데이터와 비교하여 기능성과 가용성을 확보할 수 있도록 하였다.

Medury & Madanat (2013a)는 인프라 관리에서의 하향식 및 상향식 MDP(Markov decision process) 기반 접근 방식의 차이를 줄이기 위해 동시 네트워크 수준 최적화(simultaneous network-level optimization, SNO) 프레임워크를 제안하였다. 이 접근 방식의 두드러진 특징은 의사결정의 현재 연도에 대한 시설 별 정책을 제공하는 동시에 무작위 정책을 사용하여 예상 되는 미래 비용을 계산하는 것이다. 제안된 방법론에 대해 다양한 네트워크 크기를 포함하는 파라메트릭 연구를 사용하여 최첨단 상향식(Two-Stage Bottom-Up, TSBU) 방법론과 비교하였다.

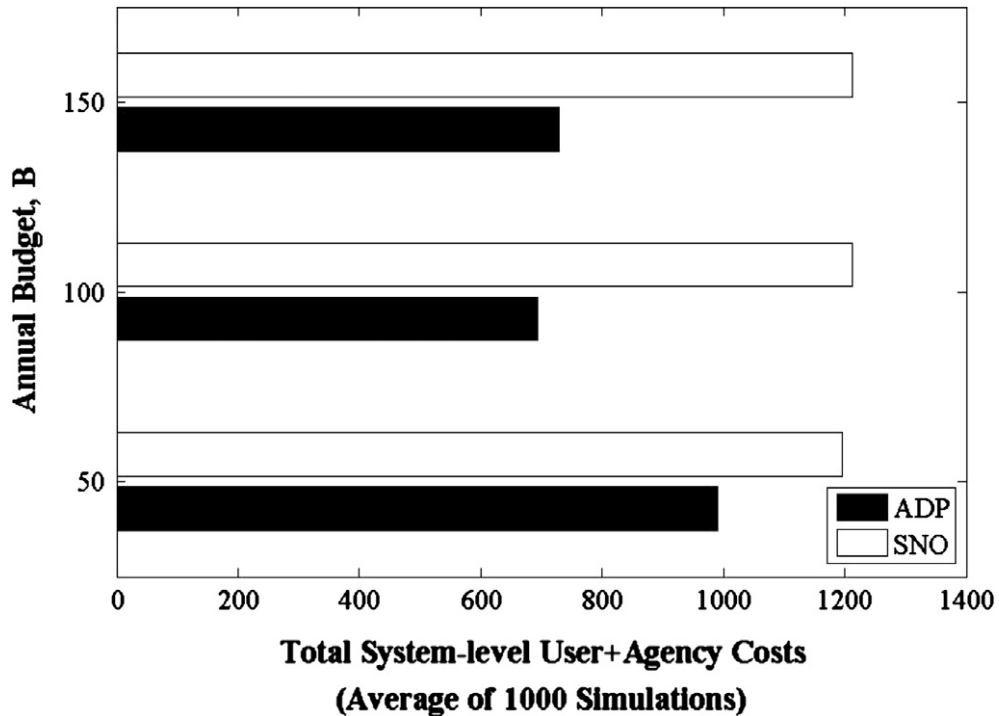
수치 예제를 사용하여 SNO 접근 방식은 다양한 네트워크 크기에 대해 일관되게 최적의 결과를 제공하는 것으로 나타났다. 또한 최첨단 MDP 기반 접근 방식은 제한된 재원을 가진 시나리오에서 차선적이고 일관성이 없는 것으로 나타났다.



[그림 II-7] SNO와 TSBU 구현에 따른 시스템 비용

Medury & Madanat (2013b)은 공사로 인한 용량 손실에 대해 기관이 정의한 네트워크 용량 임계값이 적용되는 ADP(approximated dynamic programming) 프레임 워크를 제안하였다. 의사 결정 과정에 기반한 네트워크 기반 구축 조건의 영향을 살펴보기 위해 양식화된 네트워크 구성에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 최첨단 마르코프 결정 프로세스(MDP)기반 최적화 접근법은 인프라 관리 분야에서 예산 할당 문제를 해결하는 데 최적이지만 네트워크 제약 조건 도입시 내부적으로 일관성이 없는 반면 ADP를 활용할 경우 시뮬레이션 기법과 낮은 차원의 값 함수 근사를 사용하여 복잡한 식을 풀 수 있게 해준다.

구조적 상호 의존성 문제(structural interdependence problem)는 도로 네트워크에 미치는 공사의 악영향을 설명하기 위해 도입되었다. 연구결과, 임의 할당 정책이 예산 할당 문제를 모델링하는 데 이상적이지만 이러한 네트워크 기반 제약 조건을 적절하게 포착하지 못하는 것으로 나타났다. 이에 비해 ADP는 시뮬레이션 기술을 사용하여 가치 함수 매개 변수(value function parameters)를 학습함으로써 더 나은 결과가 나타났다.

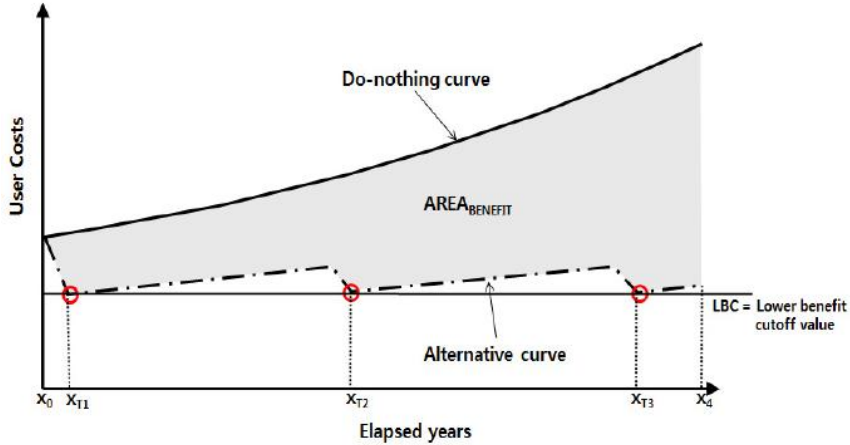


[그림 11-8] 예산 수준에 따른 SNO와 ADP의 총 비용 비교

Kuhn (2009)은 개별 인프라 관리 문제 공식의 다양한 한계를 극복하기 위해 근사 동적 프로그래밍(approximated dynamic programming, ADP)을 제안하였다. 대체 인프라 유지 보수 정책과 관련된 장기적 비용을 명시한 모델의 매개 변수는 시뮬레이션을 통해 학습된다. 도입된 방법론은 예산 제약 및 자원 제약뿐만 아니라 유지 보수 비용 또는 성능 저하의 의존성과 관련하여 시설의 대규모 이기종(heterogeneous) 네트워크를 관리 할 수 있게 한다. 도입된 방법론은 MDP에 기반한 전통적인 기법과 비교하여 수용된 인프라 조건 데이터의 형태와 악화 및 비용 추정 모델의 형식에서 보다 유연한 것으로 나타났으며, 새로운 접근법은 관련 시설의 대규모 네트워크를 관리 할 수 있게 한다.

도명식 외.(2013)의 연구에서는 분석 대상구간의 교통량의 변동은 현재의 수준을 유지하는 것으로 가정한 상태에서 유지보수 공법과 시기에 따른 편익을 산정하는 연구를 수행하였다. 유지보수 시기에 도달한 포장구간에 대해서는 아무런 보수대응을 시행하지 않은 경우와 오버레이

(overlay)로 유지보수를 시행하는 경우로 대안을 구분하여 분석을 수행하였다. 그의 연구에서의 편익은 적정 시점에서 유지보수가 이루어지지 않았을 때의 이용자 비용과 어떠한 공법으로 유지보수가 이루어 졌을 경우의 이용자 비용의 차이로 정의하여 아래와 같이 산정하였다.



[그림 11-9] 유지보수 여부에 따른 이용자 비용 및 편익 변화

$$\begin{aligned}
 AREA_{BENEFIT} = & \int_{X_0}^{X_4} (EQ_{DN} - LBC) - \int_{X_{T3}}^{X_4} (EQ_{PT} - LBC) - \int_{X_{T2}}^{X_{T3}} (EQ_{PT} - LBC) \\
 & - \int_{X_{T1}}^{X_{T2}} (EQ_{PT} - LBC) - \int_{X_0}^{X_{T1}} (EQ_{PT} - LBC)
 \end{aligned}$$

여기서, EQ_{DN} : 기본대안의 이용자 비용

EQ_{PT} : 대안(유지보수 후)의 이용자 비용

LBC : 유지보수 후의 최소 이용자 비용

X_0 : 분석기준년도

X_4 : 총 분석기간

X_{Tn} : 유지보수시기($n = 1, \dots, 3$)

그의 연구에서의 편익의 산정은 예비타당성 조사지침 및 교통시설 투자평가 지침에 따라 Do-nothing에서의 이용자비용과 유지보수 이후의 이용자 비용의 차이에 따라 산정하였다. 유지보수의 우선순위 결정과 관련하여 우선순위 평가기준으로는 최고의 포장표면 상태에서의 이용자 비용과 유지보수가 필요한 해당 연도의 이용자 비용과의 차이를 비교하여

유지보수가 지연됨으로써 증가하게 되는 부담액이 큰 순서를 기반으로 우선순위를 결정하였다. 이때, 일년 간격으로 유지보수가 지연됨에 따른 부담액을 산정해야하기 때문에 공용수명 기간 동안 발생하는 관리자 비용인 연등가비용(EUAC : Equivalent Uniform Annual Cost)로 환산하여 산정하였다.

$$B_t = \Delta UC = UC_{t+1} - UC_t$$

$$MC = EUAC = p \times \frac{i \times (1+i)^t}{(1+i)^t - 1}$$

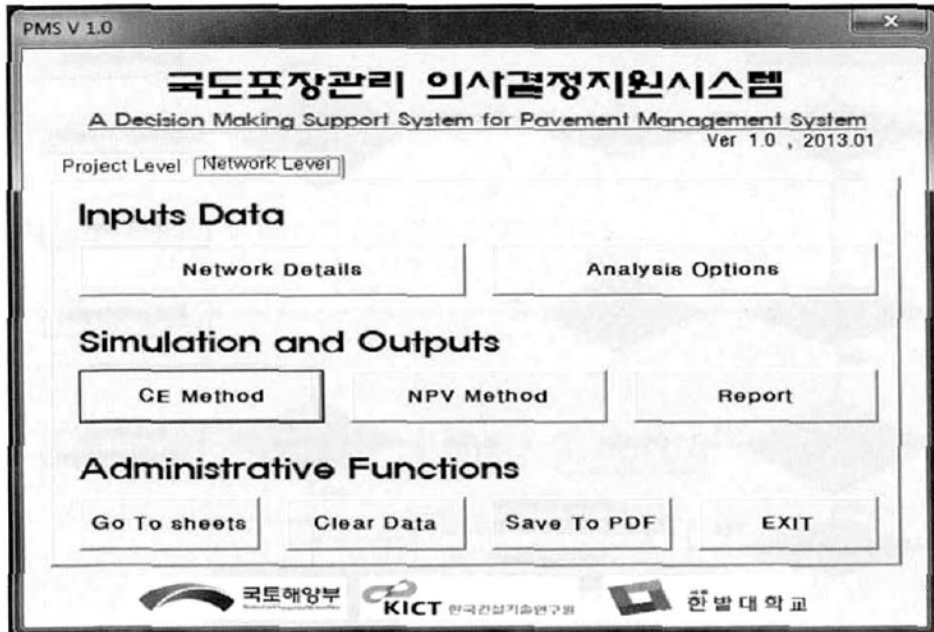
여기서, UC_t : t 년도의 이용자 비용

p : 해당년도 관리자 비용

i : 할인율(%)

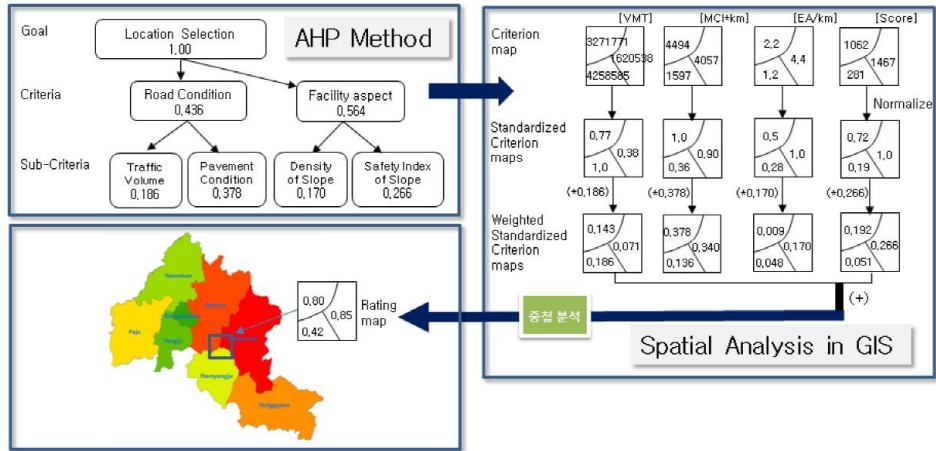
t : 비용발생 총 기간(공용 연수)

도명식 외.(2014)의 연구에서는 기존 2013년도 연구의 방법론을 활용하여 국토 포장관리를 위한 의사결정시스템 개발과 관련된 연구를 수행하였다. 해당 연구에서는 포장관리를 위한 의사결정시스템 구성요소로 도로, 교통, 사회경제 지표 등의 DB구축, 도로포장상태의 공용성 모형, 도로포장상태에 따른 차량속도변화 모형, 경제성 평가 모형 및 의사결정 지원 시스템으로 구성하였다. 의사결정시스템은 특정 구간을 대상으로 생애주기비용분석이 가능한 Project-Level 분석과 유지보수 대상 구간들 중 경제성 분석을 통한 유지보수 우선순위의 결정을 위한 Network-Level 분석으로 구분하였다. Project-Level의 분석은 특정 도로구간의 향후 30년간의 도로상태 변화과정을 생애주기비용분석을 통해 예측하여 비용필요 예상시기를 산정하는 것과 유지보수 시행 유무에 따른 최적유지보수 시점을 예측이 가능하며, Network-Level의 경우는 유지관리비 산정 및 예측, 유지보수 대상구간의 우선순위 결정, 유지보수시기(지연)에 따른 비용 변화추세 예측 및 경제성 지표 도출 등의 기능을 포함하는 시스템을 제시하였다.



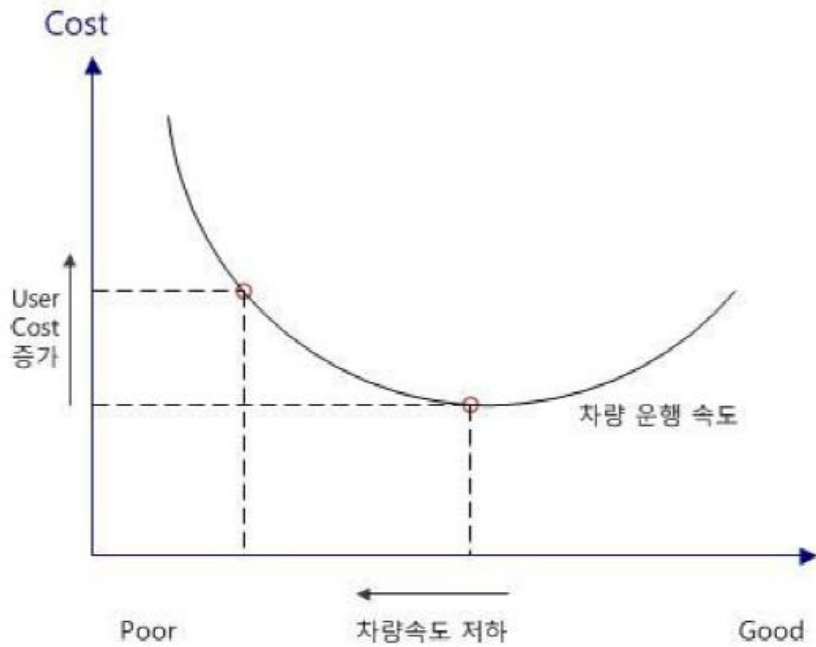
[그림 II-10] Network-Level 분석을 위한 의사결정시스템

신성필 외.(2013)는 GIS와 AHP 방법을 이용하여 한정된 예산 하에서 도로유지보수 및 방재예산 집행 우선지역을 결정하기 위한 절차를 제시하는 연구를 수행하였다. 그는 지역별 AADT, 포장상태, 절토사명 밀집도 및 각기비탈면 안전등급에 따라 AHP 계층을 구성하였으며, AHP 평가요소들의 상대적 중요도를 쌍대비교를 통해 최종가중치를 산출하였다. 이 결과를 GIS 공간분석에 반영하여 의사결정과 관련된 상충되는 목적들을 조절하여 절차의 객관성을 확보하였다.

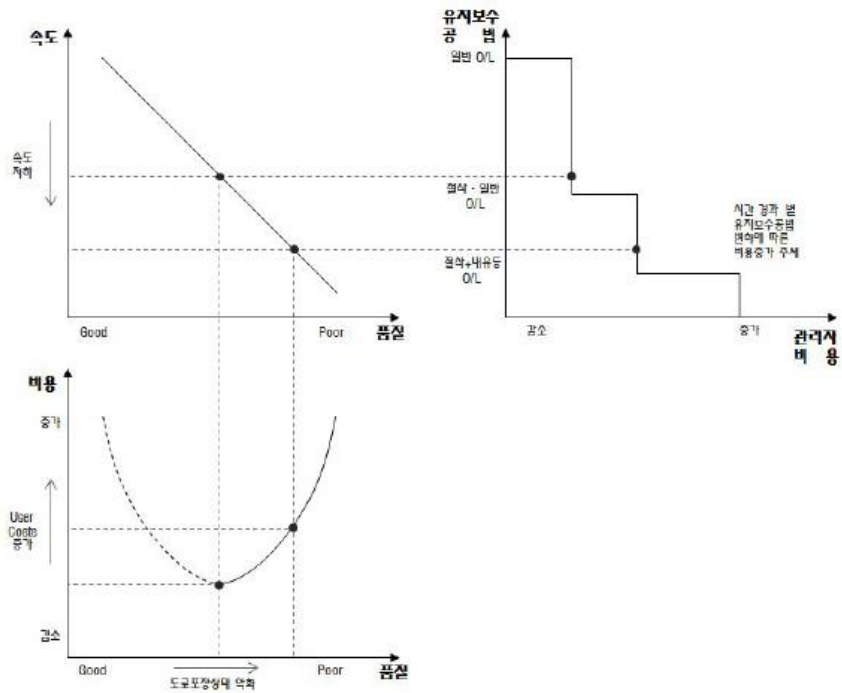


[그림 II-11] AHP와 GIS 기반의 도로유지보수 우선순위

이용준(2013)은 장래교통수요를 고려한 도로유지보수전략 수립방안에 관한 연구를 통하여 4단계 교통수요 예측모형에 기반한 장래 교통수요 추정결과를 반영한 도로유지보수전략을 제시하였다. 그의 연구에서 공용성 추정을 위하여 15년 간 포장이력자료를 기반으로 최대우도 추정법을 활용하여 균열, 러팅, IRI에 대한 포장 상태지수별 악화추세모형을 제시하였고, 정확한 교통수요예측을 위하여 대상구간 주변 택지개발 및 도로 건설 사업을 반영한 교통수요 예측을 통한 경제성 평가를 통해 최적유지보수 시기를 선정하는 방법론을 제시하였다. Case study로 춘천시 내부의 국도를 대상으로 분석하였으며, 편익산정을 위한 비용 구성은 교통수요에 큰 영향을 받지 않는 관리자 비용 및 교통수요에 따른 영향이 큰 이용자 비용으로 구성하였다. 그의 연구에서는 일반적으로 관리자 측면의 비용은 유지보수 지연으로 인한 공법이 바뀌기 전까지 유지보수를 지연하는 것이 유리하나, 이용자 측면의 비용은 즉시 유지보수를 하는 것이 유리함에 따른 trade-off 관계를 경제성분석을 통해 따라 최적의 유지보수 시기를 산정하였다.



[그림 II-12] 이용자 비용 및 편익분석 개념(좌)

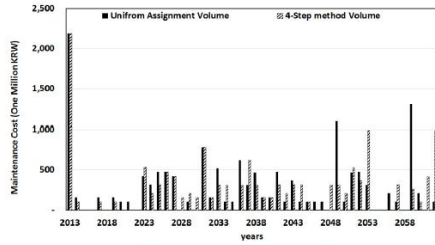


[그림 II-13] 차량속도에 따른 관리자·이용자 비용 개념도

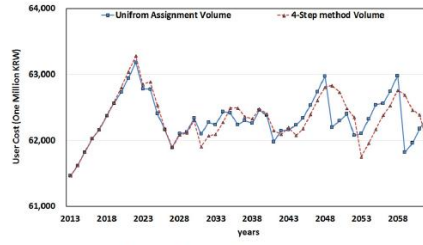
김정민 외.(2016)는 기존 국내의 도로 유지보수 정책 결정과정에서 간과되었던 장래 교통수요를 예측하는 과정에서 기존의 균일배정 교통량을 적용한 교통수요 추정방법과 Trancad를 활용한 장래 지역개발계획 및 도로 신설/확장 계획을 고려한 교통수요 추정방법에 따른 생애주기비용 모형 결과의 차이에 대한 실증적 연구를 수행하였다. 그의 연구에서는 구간별 유지보수시기를 AADT의 변화 즉, 도로표면의 누적 하중 (CESAL: Cumulative Equivalent Single Axle Loads)이 일정기준에 도달한 시기로 정의하였으며, 대전지방국토관리청 내 일반국도 데이터를 통해 CESAL을 산출하였다. 관리자비용 및 이용자비용으로 구성된 생애주기비용 중 관리자비용은 CESAL을 고려한 유지보수기준을 공법별로 적용한 값을 적용하였으며, 이용자 비용은 한국형 포장관리시스템 (KoPMS)에 적용되고 있는 차량운행비용, 통행시간비용, 환경오염비용, 소음비용을 반영한 비용으로 산정하였다. 분석 시나리오로는 예방적 유지보수 공법과 사후대응형 유지보수 공법을 비교하였고, 분석결과 예방적 유지보수 공법을 시행하는 것이 이용자편익이 커지며, 관리자 비용도 절감 할 수 있음을 확인하였다.

[표 II-5] 생애주기비용분석 결과

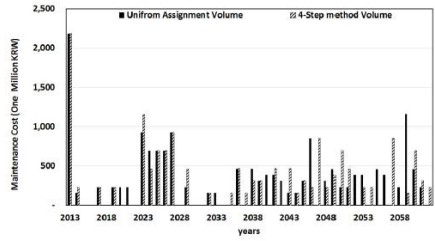
		(단위 : 백만원)	
구분		시나리오 1 (예방적 유지보수 공법)	시나리오 2 (사후대응형 유지보수 공법)
균일배정 교통량 (A)	관리자 비용	14,250	16,529
	이용자 비용	3,116,192	3,132,452
	총 비용	3,130,442	3,148,981
4단계 모형 교통량 (B)	관리자 비용	14,195	15,829
	이용자 비용	3,116,950	3,121,520
	총 비용	3,131,144	3,137,349
차이(A-B)	관리자 비용	55	700
	이용자 비용	-758	10,932
	총 비용	-702	11,632



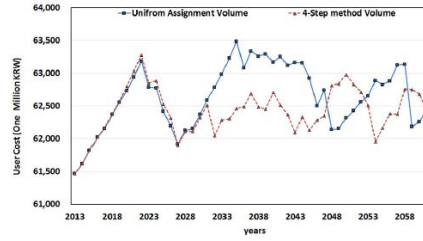
Scenario 1 - (A) Maintenance Cost



Scenario 1 - (B) User Cost



Scenario 2 - (A) Maintenance Cost

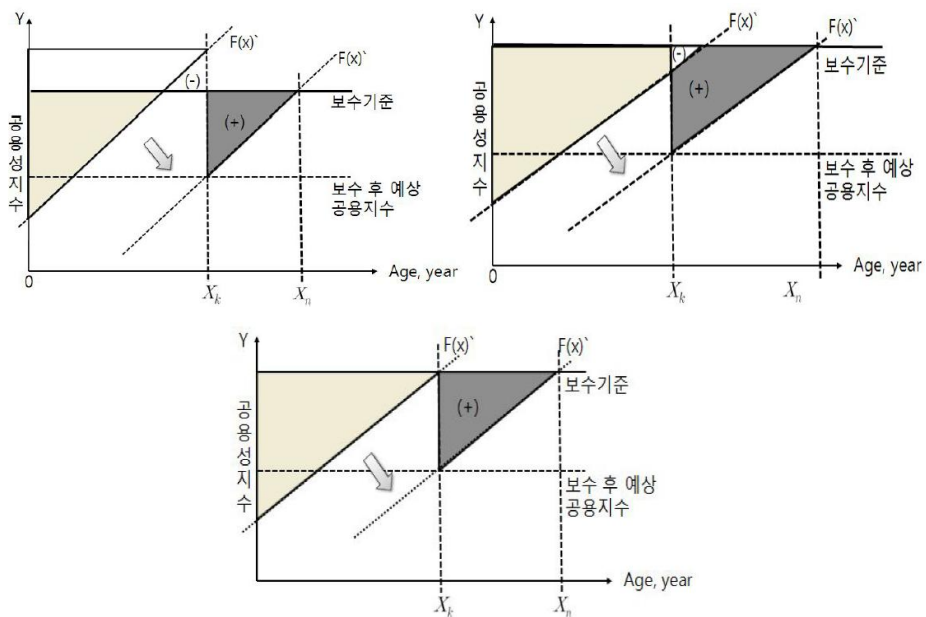


Scenario 2 - (B) User Cost

[그림 II-14] 수요추정방법/시나리오별 생애주기비용분석 결과

한상준(2010)은 도로 유지관리 후 예상되는 효과를 정량화된 편익으로 나타내고 사용자비용과 유지관리비용을 고려하여 고속도로의 유지관리 우선순위를 선정하는 방법론을 제시하였다. 그의 연구에서는 편익을 통한 정량적인 우선순위 선정을 위해 공용성 모형을 통한 개선효과 산출, 구간 공사비용 산출, 편익적용 비용 산출, 유지보수 실시에 따른 예상효과 및 수명 산출, 편익 산출, 공용성 지수별 가중치 적용, 사용자 비용 및 유지관리비용 산출의 단계를 거쳐 최종적으로 우선순위를 선정하는 절차를 제시하였다. 공용성 모형을 통한 개선효과는 아래 그림과 같이 (+) 및 (-) 효과의 합으로 구성되며, 이를 통해 예상되는 유지보수 후 예상 정량적 편익은 편익적용비용, 유지보수 후 예상효과, 교통량 및 구간연장의 곱으로 나타내었다. 공용성 지수별 가중치는 Rutting, IRI, PCI, Crack, Spalling 등 각각의 상태지수를 고려하여 공용성 지수에 따라 가중치를 주어서 각각의 공용성 지수에 따라 편익분배율을 정하게 되고 이러한 편익분배율에 따라서 각각의 공용성 지수를 적용한 예상편익을 산출하였다. 사용자 비용의 계산은 포장상태 지수에 따른 속도변화로 인한

사용자 비용, 유지보수 사업으로 인해 발생하는 사용자 비용의 두가지 비용을 우선순위 선정에 적용하였으며, 분석기간은 준공년도로부터 유지보수를 실시하였을 때 보수기준에 도달하는 시점에 대해 분석하였다. 최종적으로 우선순위를 선정함에 있어 공용성 편익을 중심으로 선정하는 방법과 사용자 편익을 중심으로 선정하는 방법 혹은 공용성 편익과 사용자 편익에 각각 가중치를 두는 다기준분석 방법 등을 제시하였다. 제안한 방법을 2008년 고속도로 7개 노선에 대해 분석하여 Case study를 수행하여, 우선순위 선정의 기준에 따라 서로 다른 개선사업 우선순위가 나타남을 정량적으로 제시하였고 보였고 공용성 모형을 통한 편익 및 사용자 편익을 동시에 고려하는 우선순위 선정방법의 필요성을 제기하였다.



[그림 II-15] 공용성 모형을 통한 유지보수 후 예상효과

최승현(2014)는 한국형 포장관리시스템(KoPMS)를 활용한 연구의 일환으로 국도포장 유지보수 공법에 대한 경제성 분석에 대한 연구를 수행하였다. 그의 연구에서는 유지보수를 실시하지 않는 경우를 기본 대안으로 설정하고 이를 4가지 유지보수 시행 대안(5AC, 내유동성, 절삭+5AC, 절삭+내용동성)과의 차이점을 비교하였고, 각 대안별로 교통량이 증가하지 않는 경우와 매년 2%씩 교통량이 증가하는 경우를 비교 분석하였다. 교통량이 증가하지 않는 경우의 분석결과 전 구간에서 총 관리자 비용이 낮은 5AC 공법이 최적대안으로 선정되었으며, 이는 현재의 공용성 모형에서 유지보수 공법에 따른 수명의 차이는 고려되지 않음에 따른 것으로 해석하였다. 이용자 비용측면에서도 유지보수를 자주 시행할수록 이용자가 받는 상대적 편익이 커짐에 따라 5AC 공법이 최적대안으로 선정되었다. 장래 교통량이 매년 2%씩 증가하는 경우에서도 5AC 공법이 최적대안으로 선정되었으나 모든 구간에서 이용자비용 및 편익이 교통량의 증가로 인해 크게 늘어남을 확인하였다. 또한 교통량이 증가하는 경우에는 해당 구간의 교통량 및 ESAL의 증가로 인해 도로 파손량이 크게 증가하여 교통량이 증가하지 않는 경우와 비교하여 유지보수의 시기, 비용 및 공법에 크게 영향을 주는 것으로 분석되었다.

[표 II-6] 유지보수기준 및 비용(2013년 기준)

유형	대안	유지보수기준			유지보수공법	원단위
		소성변형	균열	ESAL		
-	기본대안	-	-	-	무보수	-
유지 보수 공법	대안1	15이하	20~30	-	5AC	97,627
	대안2	15이하	30이상	1,000이상	내유동성	166,033
	대안3	15~20	-	1,000이상	절삭+5AC	131,180
	대안4	15~20	-	1,000이상	절삭+내용동성	201,564
		20 over	-	-		

2.4. 검토 결과 및 본 연구의 방향성

사전 연구 검토 결과 개별 사업 단위의 분석으로 유지보수 사업을 선정하고 있어 대상 사업들 간의 상호관계를 고려하여 제한된 예산 내에서의 유지보수 최적화 사업을 선정하는 것이 필요하다.

유지보수로 사업 시행에 따른 영향으로 다른 도로로의 수요 전환 및 혼잡 변동을 고려하여야 하며 통행배정을 통한 편익 산정으로 분석의 객관성을 높이고자 한다.

Toy Network를 이용하여 개별사업의 편익을 산정하여 개별사업 편익 우선순위를 선정 및 사업 시행에 따른 편익과 밀접한 관계를 가지고 있는 교통량, v/c , 통행시간 변화량을 기준으로 상호관계에 대한 영향을 고려하여 지표별 변화에 따른 우선순위를 선정 방안을 모색한다.

네트워크 최대편익 대안 선정 방안 검토와 우선순위 방안의 예산별 대안 선정결과를 비교분석하고 네트워크 확장 등의 복잡도 문제를 해결하고자 대안 선정에 유전자 알고리즘을 적용하여 알고리즘의 수렴을 확인하고 전역해와의 검증을 수행한다.

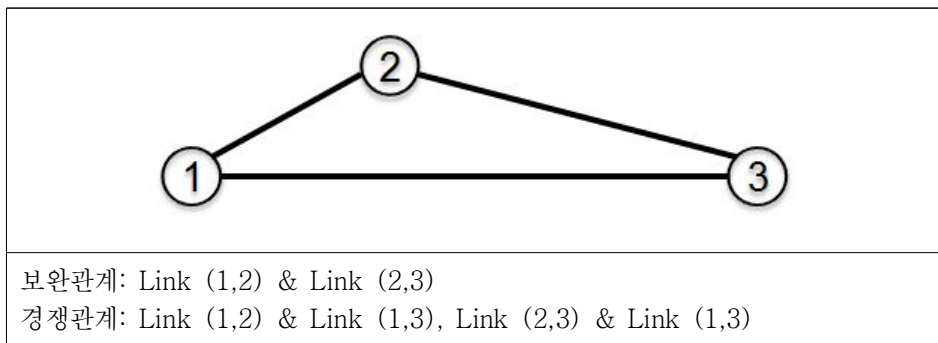
전국 네트워크를 실측 자료를 바탕으로 분석 범위를 확장하여 Toy Network에서의 분석을 검증하고 연구의 함의점을 도출하고자 한다.

3. 분석방법론

3.1. 분석의 개요

3.1.1. 도로간 상호관계

도로들은 상호관계를 가지고 있으며, 유지보수로 인한 수요전환과 이에 따른 혼잡 변동 등이 발생하고 유지보수 최적화시 개별 사업에 대한 평가가 아닌 도로간 상호관계를 고려하여야 한다.



[그림 III-1] 예제 네트워크

[그림 III-1]은 명확한 상호관계를 나타내는 예제 네트워크로 동일 경로상의 링크는 보완효과 대체도로는 경쟁효과가 나타난다.

2개 사업 시행시 보완관계에서는 물류비 절감, 전환교통량 상쇄로 인한 사업효과가 증대되고 경쟁관계에서는 전환교통량 증가로 사업효과가 감소할 것으로 판단된다.



[그림 III-2] 상호관계 효과 개념도

○ 사업대상 선정(예시)

- 총 예산 3,000만원, 비용 및 효과는 임의로 가정
- 상호관계 미반영시에는 사업효과가 가장 큰 Link(1,3)을 선정
- 상호관계 반영시 Link (1,2) & Link (2,3)의 보완효과로 최대 효과를 위해 두 사업을 선정할 것으로 예상됨

대상사업	비용	편익	B/C	사업 선정
link(1,2)	1,000	800	0.8	
link(2,3)	2,000	1,800	0.9	
link(1,3)	3,000	3,000	1.0	◎

<상호관계 미반영>

⇒

대상사업	비용	편익	B/C	사업 선정
link(1,2)	1,000	800	0.8	
link(2,3)	2,000	1,800	0.9	
link(1,3)	3,000	3,000	1.0	
link(1,2)&link(2,3)	3,000	3,300	1.1	◎

<상호관계 반영>

[그림 III-3] 사업대상 선정(예시)

3.2. 분석의 가정

도로상태는 양호한 상태에서 손상이 가장 심한 상태까지 5단계로 구분하고 공사 규모는 0~4단계로 구분한다.

공사비용은 공사규모에 따라 다르게 적용이 되며, 분석기간은 공사완료 후 30년, 예산은 1년 예산을 기준으로 하고 이자율은 5.5%로 가정한다.

또한, 분석 미시행 상태의 각 링크에 대하여 초기 상태에 따른 용량 감소와 공사 중의 용량 감소분을 고려하여 분석을 수행한다.

[표 III-1] 가정사항

구분	내용
도로상태	5단계 구분(1~5)
공사규모	5단계 구분(0~4)
공사비용	공사규모에 따라 가정
분석기간	공사완료 후 30년
용량감소	도로손상에 따른 용량감소율 가정
기타	예산, 이자율 등

도로 상태에 따른 용량감소 및 미시행시 도로 손상율에 반영하고자 도로의 손상율을 가정하여 분석에 이용한다. 도로용량편람의 공사구간 용량을 이용하여 도로상태에 따른 용량 감소율을 가정하였다.

[표 III-2] 도로상태에 따른 용량감소율

구분	도로상태				
	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계
용량감소율	0.05	0.08	0.11	0.17	0.20

공사규모는 국토교통부에서 제시하고 있는 도로포장 보수공법에 따른 km당 공사단가를 적용하여 고속도로 구간의 링크 길이에 따른 공사비용을 산정한다. 여기에서 적용 공법에 따라 보수 수준을 결정하고 그에 따른 보다 명확한 유지보수 비용을 산정한다.

[표 III-3] 보수공법에 따른 공사단가

구분	유지보수비 (천원/7,000m ²)	구분	유지보수비 (천원/7,000m ²)
소파보수	6,538	7BB+5AC	335,260
균열실링	15	10BB+5AC	439,803
폴리머 슬러리실	46,088	절삭(5cm)+5AC	131,180
절삭	35,531	내유동성	166,033
4AC	102,451	현장재생 5AC	123,325
5AC	97,627	섬유그리드+5AC	265,552
5BB+5AC	266,705	반강성	459,976

출처: 국토교통부, “2013 도로포장 관리시스템 최종보고서”, 2013

[표 III-4] 공사규모

구분	공사규모				
	0	1	2	3	4
공사등급	1등급	2등급	3등급	4등급	5등급
공사유형	미시행	소파보수	절삭	덧씌우기	절삭+덧 씌우기
공사비 (백만원/km/lane)	0	6.5	35.5	97.6	131.2
공사후 도로상태	—	1등급 ↑	2등급 ↑	3등급 ↑	4등급 ↑

3.3. 고속도로 포장 유지보수 기준

- 고속도로 포장평가지수
 - 평가위원들이 실제 주행하며 내린 결과와 실제 파손현황 간의 관계를 분석하여 개발

[표 III-5] 아스팔트 포장 HPCI 산정식

$$HPCI = 5 - 0.54 \times IRI^{0.8} - 0.75 \times RD^{1.2} - 0.90 \times \log(1 + SD)$$

여기서, IRI(International Roughness Index) = 종단편탄성지수(m/km)

RD(Rut depth) : 차바퀴패임량 (cm)

SD(Surface Distress) : 노면손상 환산면적(m²)

= 선형균열(m)×0.3 + 거북등균열(m²) + 팻칭(m²)

가중치 : 평탄성(IRI:32%)+소성변형(RD:25%)+표면손상SD:43%)

등급	HPCI 범위	상태	대응책
1등급	4.0 초과	매우 우수	Do nothing
2등급	3.5~4.0	우수	예방적 보수
3등급	3.0~3.5	보통	수선유지 필요
4등급	2.0~3.0	불량	개량 필요
5등급	2.0 이하	매우 불량	시급한 개량 필요

출처: 한국도로공사, “고속도로 유지관리 서비스 등급 기준 산정 연구”, 2012

- 우선순위 산정식
 - 한국도로공사 기준의 우선순위 산정식을 활용하여 전국 고속도로구간의 상위 링크를 선정
 - 구간 100m별로 산정식을 결정하나, 본 연구에서는 링크 구간별로 비교하기 위해 포장유지관리 구간에 따른 링크길이를 선정

도로의 상태를 나타내는 다양한 지표를 이용하여 도로의 유지보수 우선순위 산정식을 도출한다. 1,000점을 기준으로 각 도로구간(100m)별로 도출된 산정식에 따라 유지보수 순서를 정하게 된다.

[표 III-6] 우선순위 평가 산정식

산정식	비고
$HPCI + SD + RD(\text{아스팔트}) + IRI + \text{공용년수} + \text{교통량}$	1,000점 기준

출처: 한국도로공사, “포장 관리 및 유지보수 실무 편람”, 2012

3.4. 편의 우선순위 선정

시행사업 선정의 경제적 효과 분석을 위하여 통행배정을 통한 대상사업 시행에 따른 편익을 산정하여 우선순위를 선정하였으며, 한국개발연구원의 ‘도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판), 2008’을 기준으로 다음과 같이 산정하였다.

3.4.1. 통행배정

도로부문의 통행배정은 Wardrop의 제1원칙에 따른 결정론적(Deterministic) 통행배정기법을 활용한 이용자 균형(User equilibrium)을 가정하며, 이러한 이용자 균형의 해는 Frank-Wolf algorithm에 의하여 계산된다. 경로선택의 결정요인으로는 통행시간, 통행거리, 통행비용 등을 고려한다.

$$\begin{aligned} \min z(x) &= \sum_a \int_0^{x_a} c_a(x_a) dx \\ s.t. \quad \sum_k f_k^{rs} &= d_{rs} \\ f_k^{rs} &\geq 0 \\ x_a &= \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \end{aligned}$$

통행배정모형은 개별 통행자들이 각자의 통행비용을 최소화하는 경로를 선택한다고 가정하고 사업 시행 전·후의 네트워크 전체에서 발생하는 통행패턴의 변화를 분석하는 접근방법이다. 이때 도로 이용자의 통행비용은 ‘일반화 비용’, 즉 시간비용과 요금, 예를 들어 고속도로 통행료로 표현되는 금전적 비용의 합으로 표현되며, 아래의 식과 같은 교통량-지체함수로 표현된다.

$$T = T_0 [1 + \alpha (V/C)^\beta]$$

T : 링크통행시간

T_0 : 링크 자유통행시간

V : 링크교통량

C : 링크용량

α, β : 파라미터

3.4.2. 편익산정

교통시설 투자사업의 시행으로 발생하는 편익은 교통 측면의 편익인 직접편익과 교통개선으로 인한 사회적 편익인 간접편익으로 구분할 수 있다. 교통시설사업 시행 시 교통시설의 이용자들에게 발생하는 직접편익으로는 차량운행비용 절감, 통행시간 절감, 교통사고 감소, 쾌적성 증가, 정시성 향상, 안정성 향상 등을 들 수 있다. 이 가운데 차량운행비용 절감, 통행시간 절감, 교통사고 감소 등의 편익을 화폐가치화하는 작업은 비교적 용이하나, 교통의 쾌적성, 정시성, 안정성 향상 등의 효과는 개인별 주관적 만족도에 따라 가치가 달라질 수 있기 때문에 화폐가치화하는데 어려움이 수반된다.

따라서 본 연구에서는 통행시간 절감, 차량운행비용 절감, 환경비용(대기오염) 절감 편익을 대상으로 분석을 수행한다.

[표 III-7] 도로·철도 부문 사업 시행에 따른 편익항목

구분	편익항목
직접편익	<ul style="list-style-type: none"> · 차량운행비용 절감 · 통행시간 절감 · 교통사고 감소 · 쾌적성 증가, 정시성 향상, 안정성 향상 등*
간접편익	<ul style="list-style-type: none"> · 환경비용(공해 및 소음) 절감 · 지역개발 효과* · 시장권 확대* · 지역 산업구조 개편*

출처: 한국개발연구원, “도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판)”, 2008.

주: *는 편익 산정 시 계량화하여 반영하지 못한 항목임.

차량운행비용은 차량의 감가상각비, 보험료 등의 고정비와 유류비, 엔진오일비 등의 변동비로 구분되며, 교통시설사업 시행으로 통행거리가 단축되고 통행속도가 증가함에 따라 차량운행비용이 감소되는 효과가 발생한다.

분석대상 사업의 통행배정 작업의 결과로 산출된 주행속도와 교통량을 이용하여 주행속도에 따른 차량운행비용 원단위를 적용하여 차량운행비용 절감편익(The Valuation of Vehicle Operating Costs Savings: VOCS)을 산정한다.

$$VOCS = VOC_{\text{사업미시행}} - VOC_{\text{사업시행}}$$

$$\text{여기서, } VOC = \sum_l \sum_{k=1}^3 (D_{lk} \times VT_k \times 365)$$

D_{lk} = 링크별(l), 차종별(k) 대- km

VT_k = 차종별(k) 해당 링크 주행속도의 km 당 차량운행비용

k = 차종(1: 승용차, 2: 버스, 3: 화물차)

사업시행으로 통행자의 교통수단, 통행경로, 통행속도 등 교통패턴의 변화가 발생하며, 해당 교통시설을 통행하는 통행자는 물론 주변 교통네트워크를 이용하는 통행자의 통행시간에도 영향을 미친다. 이러한 영향은 운전자뿐 아니라 함께 승차하고 있는 승객의 통행시간도 달라지는 변화를 가져온다.

통행배정의 결과로 산출된 직접 영향권 내 링크의 통행시간과 차종별 교통량의 곱을 이용하여 통행시간 절감편익(The Valuation of Travel Time Savings: VOTS)을 산정한다.

$$VOTS = VOT_{\text{사업미시행}} - VOT_{\text{사업시행}}$$

$$\text{여기서, } VOT = \sum_l \sum_{k=1}^4 (T_{kl} \times P_k \times Q_{kl} \times 365)$$

T_{kl} = 링크 l 의 차종별, 인별 통행시간

P_k = 차종별, 인별 시간가치

Q_{kl} = 링크 l 의 차종별, 인별 통행량

k = 차종(1: 승용차, 2: 버스, 3: 화물차), 인(4: 철도)

교통부문 사업의 시행에 따른 환경영향으로는 대기오염, 수질오염, 소음, 진동, 지반침하 등이 있으나, 경제적 가치 환산에 불확실성을 내포하고 있어 계량화가 용이한 대기오염 절감편익을 반영하였다.

통행배정의 결과로 산출된 주행속도와 교통량을 이용하여 주행속도에 따른 대기오염비용 원단위를 적용하여 대기오염비용 절감편익(The Valuation of Pollution Costs Savings: VOPCS)을 산정한다.

$$VOPCS = VOPC_{\text{사업미시행}} - VOPC_{\text{사업시행}}$$

$$\text{여기서, } VOPC = \sum_l \sum_{k=1}^3 (D_{lk} \times VT_k \times 365)$$

D_{lk} = 링크별(l), 차종별(k) 대- km

VT_k = 차종별(k) 해당 링크 주행속도의 km 당 대기오염비용

k = 차종(1: 승용차, 2: 버스, 3: 화물차)

3.5. 지표별 우선순위 선정

대상사업의 시행으로 해당 사업뿐만 아니라 네트워크 상의 타 링크들 또한 교통량, 통행시간 등 교통패턴의 변화가 발생하게 되고 상호관계의 정도에 따라

○ 개별사업의 편익

사업시행으로 교통량, 통행시간 등 교통패턴의 변화가 발생하며, 이에 따른 효과로 편익이 발생하므로 편익과 밀접한 관계를 가지고 있는 정량적 지표인 교통량, v/c , 통행시간의 변화량과 편익의 관계에 대하여 분석을 수행한다.

사업시행에 따른 대상사업들의 교통량 증가량과 편익의 분석결과 비례하는 것으로 나타났으며, 사업시행으로 인한 개선효과인 교통량 증대로 대상사업들 외 링크에서의 유입효과가 나타나 통행시간 감소, 통행속도 증가 등으로 네트워크 전체의 편익이 증대되는 것으로 판단된다.

대상사업들의 v/c 증가량과 편익의 분석결과 역시 비례하는 것으로 분석 되었으며, 사업시행으로 인한 개선효과인 교통량 증가로 네트워크의 편익이 증가하고 시행사업의 수(1~7개)에 따라 용량감소 효과의 차이가 나타나 시행사업 개수별로 구분이 되어 나타나는 것을 확인하였다.

사업시행에 따른 대상사업들의 통행시간 감소량과 편익의 분석결과 또한 비례하는 것으로 나타났으며, 통행시간 절감 편익에 끼치는 영향으로 전체 네트워크의 편익이 증대되며 세 지표 중 가장 편익과 밀접한 관계를 가지는 것으로 분석되어 편익에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

정량적 지표인 교통량, v/c , 통행시간의 변화량과 편익의 관계에 대한 분석결과 모든 지표는 편익과 비례하는 것으로 나타나며 이를 이용하여 개별적 분석이 아닌 상호관계에 대한 영향을 파악하고 영향의 정도에 따른 우선순위를 산정하여 대안 선정에 이용한다.

3.6. 네트워크 최대편익 대안 선정

도로들은 상호관계를 가지고 있으며, 유지보수로 인한 수요전환과 이에 따른 혼잡 변동 등이 발생하여 유지보수 최적화시 개별 사업에 대한 평가가 아닌 도로간 상호관계를 고려하여야 한다. 개별사업의 편익 우선 순위 분석을 통하여 시행사업의 편익 증대방안을 모색할 수 있으나 시행 사업 선정에 있어서 개별사업 단위의 분석은 최적의 유지보수 대안 선정에 한계가 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 사업 시행 전후의 통행시간 절감편익, 운행비용 절감편익, 그리고 대기오염비용 절감편익을 합하여 최대의 편익을 도출할 수 있는 모형식을 도출하였다. 여기에서 연간 유지보수에 사용할 수 있는 예산이 제약되어 있기 때문에 이러한 제약에 따른 최대 편익 대안 선정 방안을 제시하였다.

$$Obj: \max \left\{ \sum VOTS_i + VOCS_i + VOPCS_i \right\} X_i$$

$$s.t.: \sum X_i C_i \leq Budget$$

X_i : 대상사업 i 시행시 1; 그렇지 않으면 0

C_i : 대상사업 i 공사비용

$VOTS$: 통행시간 절감편익

$VOCS$: 운행비용 절감편익

$VOPCS$: 대기오염비용 절감편익

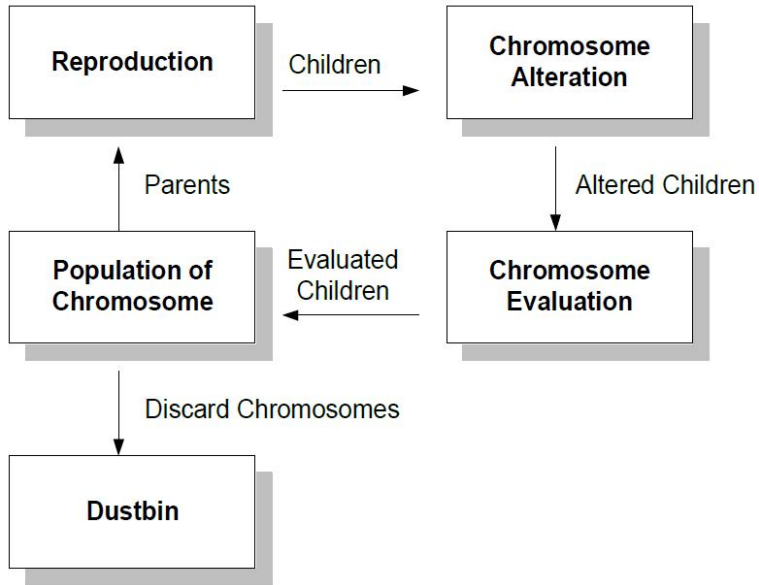
3.7. 유전자 알고리즘

도로간 상호관계를 고려한 네트워크 측면의 분석은 한정된 예산내에서의 최대 편익을 산정할 수 있으나 대상사업의 수가 증가할 경우 복잡도의 문제가 발생하여 분석 시간의 기하급수적인 증가가 나타난다.

이를 해결하기 위하여 유전자 알고리즘을 적용하여 최적 대안을 선정하는 연구를 진행하였다.

3.7.1. 유전자 알고리즘 개요¹⁵⁾

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)은 Holland(1975)에 의해 개발된 병렬적이고 전역적(global)인 알고리즘으로 다윈이 주장한 자연진화법칙인 적자생존(survival of fittest)과 자연도태(natural selection)의 원리를 토대로 해 공간에 대한 확률적 탐색을 통해 복잡한 문제의 근사 최적해를 비교적 합리적인 시간에 제공하는 메타 휴리스틱 기법이다(나호영, 2008). 일정한 환경에 무리를 지어 살고 있는 생명체들은 그 환경에 적합한 형질을 가진 개체가 보다 높은 생존확률을 가지며, 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 등의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 진화해 나가고 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정을 통해 점차 도태되어간다. 이와 같은 진화 과정을 통해 세대를 거듭할수록 주어진 환경에 가장 적합한 개체들로 형성될 것이라는 것이 유전자 알고리즘의 주요 내용이다.



[그림 III-4] GA 내 유전자 진화과정

3.7.2. 유전자 알고리즘 특징

유전자 알고리즘은 기존의 다른 알고리즘과 다른 전역적(global)이고 확률론적인 최적화 방법이다. 고전적인 알고리즘들은 제어기에 대한 충분한 지식과 시스템의 수학적 해석 및 계산에 의해 구성된다. 이렇게 설계된 시스템은 주어진 환경에서 지역적(local)일 수 있고, 설계자의 경험에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. 그러나 유전자 알고리즘은 전역적인 최적해를 발견할 가능성이 높고 목적값(objective value)에 대한 수학적 제약이 거의 없기 때문에 여러 분야에 적용할 수 있다.

[표 III-8] 생물학과 유전자 알고리즘 용어 비교

응용분야	응용사례
최적화	수치적 함수 최적화, 가스 파이프라인 최적화, 전력송전망 최적화, 컴퓨터 자판 최적 배정문제, 항공기승무원 배정문제, 순회 외판원문제, 그래프 분할문제, 유전자 정보해석 등
설계	VLSI 회로설계, 비행기날개 공기역학적 설계, 엔진노즐 설계, 컴퓨터 통신망 최적 설계, 심장박동기 설계, 디지털 필터 설계, 퍼지 제어기 설계 등
인공지능	LISP프로그램 자동 생성 문제해결 규칙의 자동 습득, 신경망 합성 및 학습, 패턴인식, 자연언어 처리, 멀티에이전트 시스템 등
시스템분석 및 예측	시스템 동정, 케이오틱 시계열의 예측, 확률변화 예측, 단백질 구조 분석, 재정 및 경제 분야에서의 예측 및 분석문제 등
제어 및 로봇틱스	이동 로봇의 경로 계획, 신경망 및 퍼지 로직과 유전자 알고리즘의 결합에 의한 제어 등

유전자 알고리즘은 미지의 함수 $Y=f(x)$ 를 최적화하는 해 x 를 찾는 탐색 알고리즘으로써 기존 최적화 알고리즘들과는 다른 다음과 같은 차이점을 갖는다.

- ① 유전자 알고리즘은 파라미터 그 자체를 사용하는 것이 아니라 파라미터 집합을 코딩해서 사용한다. 짙은 염색체를 나타내게 된다.
- ② 유전자 알고리즘은 탐색 공간에서 단일해(string)를 사용하는 것이 아니라 해 집단을 사용한다. 해 집단은 염색체들로 이루어진다.
- ③ 유전자 알고리즘은 결정론적인 전이규칙(deterministic transition rule)이 아닌 확률적인 규칙을 사용한다.
- ④ 유전자 알고리즘은 미분 가능성, 연속성 등과 같은 최적화 함수의 정보를 필요치 않고 단지 적합도 값만을 사용한다.

3.7.3. 유전자 알고리즘 구조

자연계에 있는 생물의 진화는 어떤 세대(generation)를 형성하는 개체(individual)들의 집합인 개체군(population) 중 환경에 대한 적합도(fitness)가 높은 개체가 높은 확률로 살아남아 재생산(reproduction)되며,

교배(crossover) 및 돌연변이(mutation)를 거쳐 다음 세대의 개체군을 형성하는 과정이다. GA에서 한 세대의 개체수를 개체군의 크기(population size)라고 한다. 개체는 염색체(chromosome)라고도 한다. 유전자의 위치를 유전자좌(locus)라 하고 유전자가 갖게 되는 유전자의 후보를 대립 유전자(형질, allele)라고 한다. 생물의 경우 염색체는 어떤 개체의 특징을 상세하게 결정하게 되는데, 예를 들어, 머리가 검은 것은 염색체 중에 이러한 특징을 나타내도록 하는 유전자의 조합이 존재하기 때문이다. 이러한 개념을 바탕으로 생물학과 유전자 알고리즘 용어를 비교하면 아래와 같다.

[표 III-9] 생물학과 유전자 알고리즘 용어 비교

생물학	유전자 알고리즘
개체(individual)	염색체에 의해 특징지어지는 하나의 작은 집단
집단(population)	집단 내의 개체의 수로 염색체가 클수록 커짐
유전자(gene)	개체의 형질을 규정하는 기본구성요소, 특성, 형질
염색체(chromosome)	복수의 유전자 모임, 문자열(string)로 표현
대립 유전자(allele)	유전자가 갖는 특성값(feature value)
유전자 자리(locus)	염색체상의 유전자의 위치 즉, 문자열의 위치(string position)
적합도(fitness)	유전자의 각 개체의 환경에 대한 적합의 비율을 평가하는 값

GA의 알고리즘 연산자는 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 등으로 구성되며, 알고리즘 내에서 연산을 통해 보다 좋은 방향으로 진화해 나간다.

① 선택(selection)

선택연산은 개체군의 집단 내에서 적합도에 따라 다음 세대 개체의 생존분포를 결정한다. 적합도에 기초하고 있기 때문에 적합도가 높은 개체일수록 보다 많은 자손을 남기게 된다. 일반적으로 널리 사용되는 선택방법에는 적합도 비례 선택법(proportion selection), 룰렛 휠 선택법

(roulette wheel selection), 엘리트보존선택법(elitist preserving selection) 등이 있으며 이들이 조합되어 사용되는 경우도 있다.

○ 적합도 비례 선택법(proportion selection)

선택 중에서도 가장 일반적인 방법으로, 각 개체의 자손(s_i)은 그 적합도에 비례한 확률($fit(s_i)$)에 의해 선택된다. 따라서 적합도(p_i)가 큰 개체일수록 선택되기가 쉽고, 재생산 될 가능성이 높다. 이를 수식으로 나타내면 아래와 같다. 이 방법은 가장 우수한 개체도 우연에 의해 다음 세대에 선택되지 않을 수 있고, 또 가장 열등한 개체라도 자식을 복제할 수 있는 가능성을 전혀 배제하지 않은 보수적인 선택방법이다.

$$p_i = \frac{fit(s_i)}{\sum_{j=1}^N fit(s_j)}$$

○ 룰렛 휠 선택법(roulette wheel selection)

룰렛 휠 선택법은 룰렛게임에서와 같이 적합도 값이 좋은 개체에게 많은 선택 확률을 부여하고 나쁜 개체에는 적은 선택확률을 부여함으로써 확률적 랜덤 탐색이 가능하도록 하는 방법이다. 즉, 적합도에 비례해 선택확률을 부여하는 방법이므로 적합도 비례 선택이라고도 한다.

step 1) 각 개체 s_i 에 대한 적합도 값($fit(s_i)$) 계산

step 2) 개체 집단의 총 적합도(F)를 구한 후 이를 이용해 각 개체의 선택확률(p_i) 계산

$$F = \sum_{i=1}^{pop-size} fit(s_i), \quad p_i = \frac{fit(s_i)}{F}$$

step 3) 각 개체 s_i 에 대한 누적확률(q_i) 계산

$$q_i = \sum_{j=1}^i p_j$$

step 4) 룰렛을 개체 수($pop-size$)만큼 돌려서 새로운 개체 집단을 위한 각각의 개체생성

(이때, 범위 $[0, 1]$ 사이에서 부동 소수점 난수(r)를 발생시켜, $r \leq q_i$ 이

면 첫 번째 개체 u_1 을 선택하고, 그렇지 않으면 $q_{i-1} < r \leq q_i$ 인 i 번째 개체 s_i 를 선택함)

○ 엘리트보존선택법(elitist preserving selection)

개체 중 가장 적합도가 높은 개체는 그대로 보존하여 다음 세대에 남기는 방법이다. 즉, 어떤 세대에서 최고의 개체는 교차나 돌연변이에 의해 변형을 받지 않고 다음세대에 보존된다. 그러나 경우에 따라서 국소적인 해로 수렴할 위험을 있어 일반적으로 다른 방식과 조합하여 사용한다.

② 교배(crossover)

선택 연산자는 적합도가 가장 높은 개체 쪽으로 진화하게 되지만 새로운 개체를 생성하기는 어렵다. 따라서 유전자의 교환과 같은 다른 유전자를 갖는 개체들을 생성하기 위해 교배과정을 수행한다. 예를 들면, 교배확률에 의해 선택된 부모 1, 2가 있고, 문자열의 길이보다 작은 임의의 수 k (교배위치)를 랜덤으로 선택하여 두 개체의 문자열의 k 오른쪽 부분을 서로 교환한다.

교배의 종류에는 교배위치가 1개인 단순 교배(simple crossover), 교배위치가 2개 이상인 복수교배(multi-point crossover)와 각 유전자가 독립적으로 교환될 수 있도록 마스크를 이용한 균등교배(uniform crossover) 등이 있다. 이 과정은 적합도가 높은 개체들을 결합하여 현재 집단을 전역에 확산시키는 역할을 하며 다른 최적화 알고리즘에 없는 가장 중요한 과정이다.

③ 돌연변이(mutation)

선택과 교배는 집단 내 개체들이 가지고 있는 정보들을 이용해 결합하고 탐색하여 새로운 개체를 생성하는 과정이다. 따라서 다양성을 유지하기 위해 현재 집단에 존재하지 않는 새로운 정보를 제공하고, 지역적 최적값으로 치우치는 것을 보완하는 것이 돌연변이 연산과정이다. 유전자에 돌연변이 적용 예대하여 일정한 돌연변이 확률(mutation rate :

P_m)을 적용하여 난수를 발생시켜 돌연변이 확률보다 크거나 혹은 작은 비트를 선택하여 해당비트의 유전자 값을 변화시킨다. 돌연변이 확률을 너무 크게 하면 나쁜 방향으로 변이의 확률도 크게 되므로 적당한 돌연변이 확률을 설계해야 한다.

④ 적합도

적합도는 최적화 하고자 하는 함수의 각 개체의 적합도를 평가하는데 기반이 된다. 그러나 적합도 값의 범위는 문제마다 다르기 때문에 보통 정해진 구간사이에서 양수 값을 갖는 적합도를 사용한다.

⑤ 설계상수

GA에 의한 탐색 또는 최적화 문제의 해결에 있어서 미지의 영역에 대한 탐색(exploration)과 획득한 정보의 유효한 이용(exploitation)의 조화가 중요하다. 획득한 정보의 유효한 이용은 기존의 등고선법(hill-climbing)과 유사하며, 미지의 영역에 대한 탐색이 강조 될수록 랜덤 탐색(random search)과 같은 특성을 나타내게 된다. GA는 이러한 두 가지의 조건을 함께 제어할 수 있는 알고리즘이다. 이를 제어하기 위한 중요한 파라미터는 개체군의 크기(population size : M), 교배확률(probability of crossover : P_c), 돌연변이 확률(probability of mutation : P_m) 등이 있다. 일반적으로 큰 P_c 와 P_m 값은 알고리즘의 exploration 능력을 향상시킴으로 진화 초기에 적합도가 높은 탐색공간을 찾는데 유리하게 작용하지만, 동시에 exploitation능력을 저하시킴으로써 어느 정도 좋은 해를 찾은 후 에는 이 탐색 공간 내에서 최적해로 수렴하는 데 있어서 수렴속도를 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 이와 반대로 작은 P_c 와 P_m 값은 반대의 특성을 나타낸다. 한편, 개체군의 크기 이 작으면 적합도 계산에 필요한 시간을 절약할 수 있으나 개체 간 다양성의 빠른 손실로 인해 최적해를 구하기 전에 수렴할 위험성을 내포한다. 반면에, 개체군의 크기가 크면 최적해에 도달할 확률은 높으나 많은 기억용량과 계산시간을 필요로 한다. 따라서 이들의 성능 평가 항목을 모두 만족시켜 주는 최적의 개체군의 크기를 정하는 방법은 문제의 성격과 다른

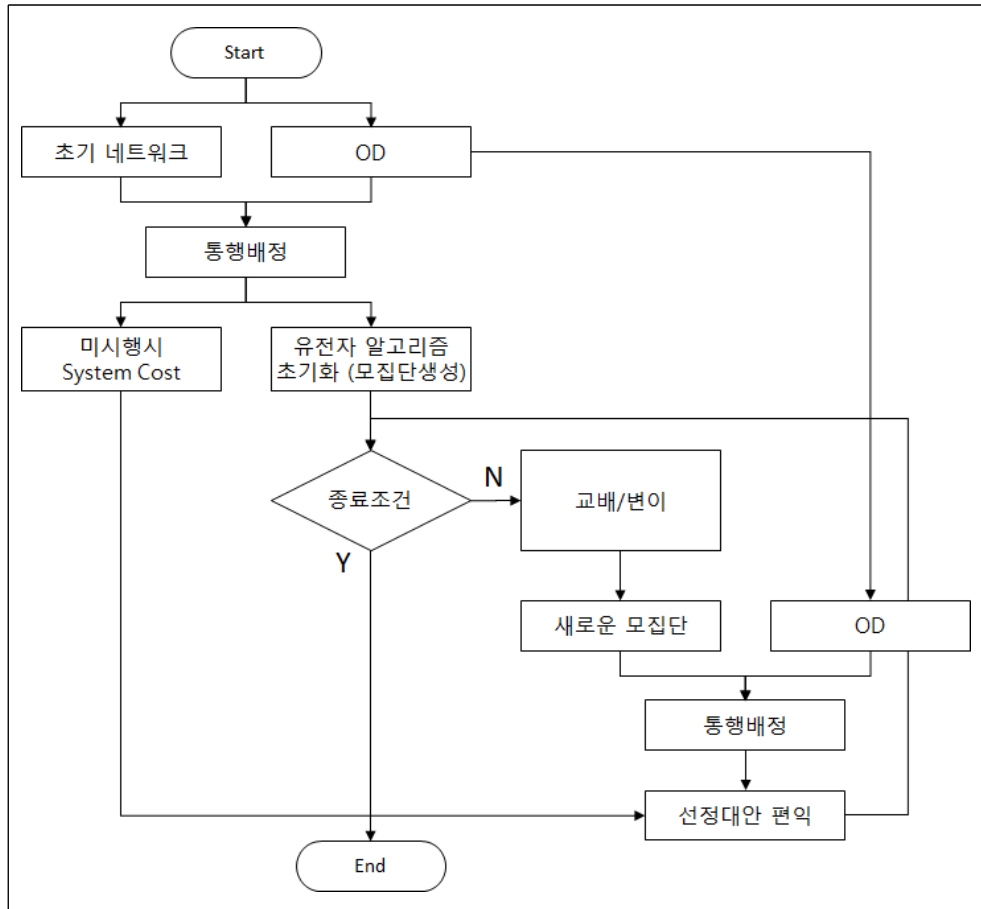
제어 파라미터들의 값에 따라 달라진다.

⑥ 수렴기준

새롭게 형성된 해들(염색체)이 적절한 수렴범위를 만족하거나 또는 처음에 설정한 최대 세대수에 도달하면 계산을 종료하게 된다. 일반적인 수렴조건으로는 최대 적합도를 가지는 설계점들이 더 이상 진전이 없거나, 전체적으로 평균 적합도의 발전이 없을 때, 또는 $(f_{\max} - f_{\text{avg}})$ 값이 0에 가까우면 수렴한다고 판정한다(Srinivas, et. al, 1994).

3.7.4. 유전자 알고리즘의 pseudo code 및 순서처리도

상기 설명한 GA의 구조를 바탕으로 본 연구에 적용한 방법은 아래와 같다.



[그림 III-5] 본 연구의 GA를 활용한 분석 방법론

3.8. 분석 프로세스

본 연구에서는 Toy Network를 이용하여 모형식에 대한 1차적인 분석과 결과 차이를 비교한다. Toy Network는 Nguyen-Dupuis 네트워크를 수정하여 사용되며, 링크를 고속도로와 국도로 구분하여 분석을 수행한다.

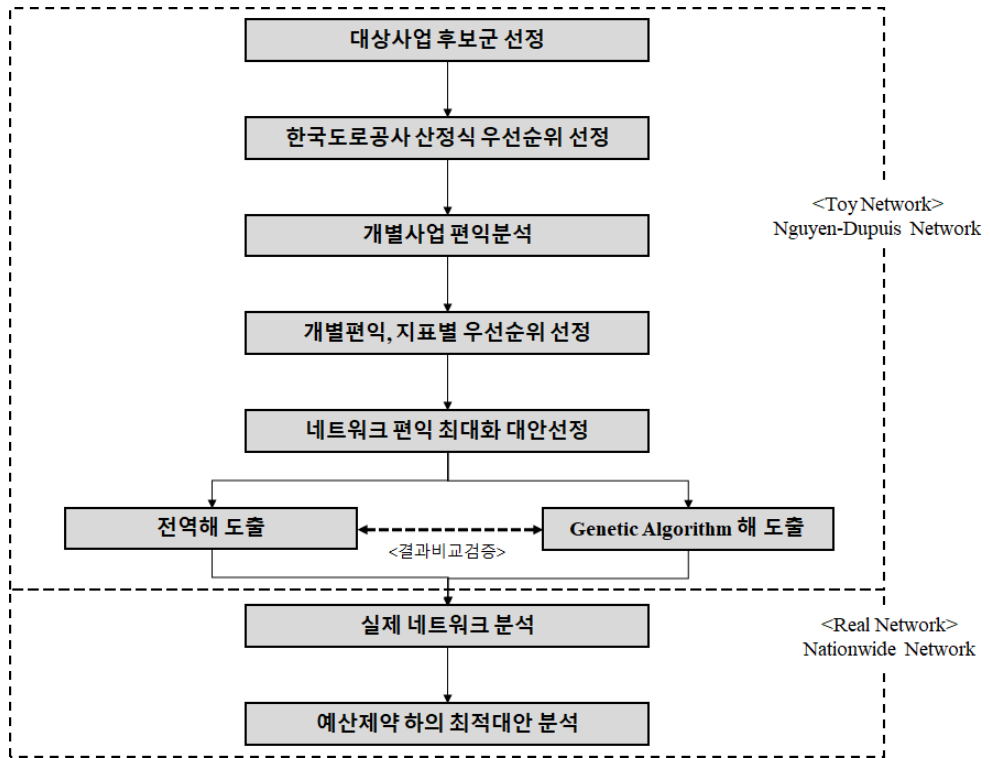
고속도로의 유지보수에 관련된 분석으로 대상사업 후보군을 선정하고 도로의 상태를 가정하여 도로공사 산정식에 따른 우선순위를 선정한다. 또한, 개별사업을 시행하였을 경우에 대한 편익우선순위를 분석하여 기존의 도로공사 산정식에 따른 우선순위 결과와 비교한다.

개별 편익 분석의 결과를 이용하여 교통량, 통행시간 등 교통패턴의 변화에 따른 정량적 지표인 교통량, v/c , 통행시간의 변화량을 기준으로 각 지표별 우선순위를 선정한다.

소규모 Network에서는 연산시간이 상대적으로 낮아 모든 조합에 대한 최적대안을 도출할 수 있으나, 실제 네트워크에서는 그 규모가 크기 때문에 전역해를 모두 도출하기에는 시간과 노력의 정도가 매우 크다. 따라서, 본 연구에서는 실제 네트워크에서의 효율적인 해를 도출하기 위해 유전자 알고리즘을 도입하였다. 유전자 알고리즘의 성능을 분석하기 위해 Toy Network에서 기존의 전역해와 유전자 알고리즘을 통해 도출된 해 간의 결과를 비교한다. 전역해와 유전자 알고리즘에 의한 해의 차이가 유의하다면, 실제 네트워크에서도 유사한 결과를 도출할 수 있을 것이라 판단된다.

또한, 국내 실정에 맞게 연간 유지 보수할 수 있는 예산의 제약에 따라 전체 사업 중에 일부 사업만 시행할 수 있도록 예산에 대한 제약을 두어 최종적인 해를 도출하였다.

Toy Network 상에서 검증된 유전자 알고리즘을 이용하여 실제 네트워크에서의 최적해를 도출할 수 있도록 한다.

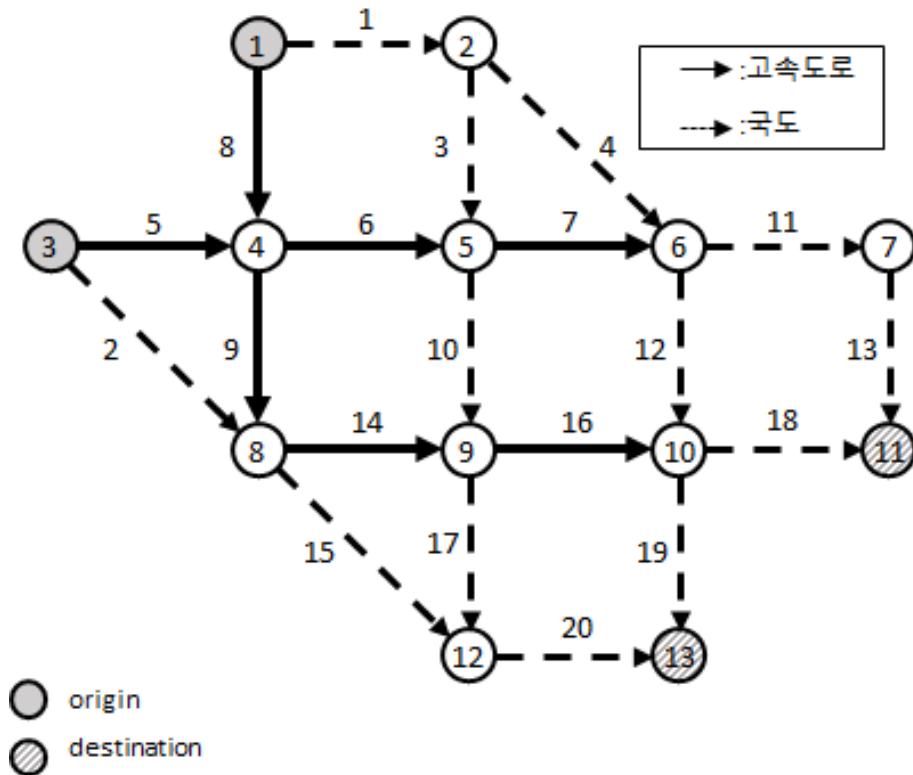


[그림 III-6] 분석 프로세스

4. Toy Network 분석

4.1. 분석 네트워크

Nguyen & Dupuis Network를 수정하여 13개 노드와 20개 링크로 구성된 Toy Network 구축하였다.



[그림 IV-1] 분석 Toy Network

[표 IV-1] Toy Network 분석 O/D

O \ D	11	13
1	42,500	42,500
3	42,500	42,500

고속도로는 크게 2개의 축으로 구분하여 교차하는 노드(노드 4)를 JC, 국도와 교차하는 노드를 IC로 가정하여 현실을 모사하였다.

실제의 도로 환경 구현을 위하여 7개의 고속도로 링크와 13개의 국도 링크로 구분하고 전국 지역간 네트워크 배포자료를 이용하여 VDF, 자유통행속도, 용량 등을 반영하였다.

[표 IV-2] Toy Network 분석 자료

링크번호	링크길이	용량	차로수	초기상태
1	4	1400	2	3
2	11	1400	2	3
3	3	1400	2	3
4	8	1400	2	3
5	7	1987	3	5
6	5	1987	3	5
7	6	1987	3	5
8	5	1987	3	5
9	4	1987	3	5
10	8	1400	2	3
11	4	1400	2	3
12	4	1400	2	3
13	4	1400	2	3
14	7	1987	3	5
15	11	1400	2	3
16	6	1987	3	5
17	4	1400	2	3
18	10	1400	2	3
19	4	1400	2	3
20	5	1400	2	3

[표 IV-3] 지방부 도로 VDF 파라메타 최적값

등급	도로 유형	교차로밀도 (개/km)	차로수	α	β	자유속도 (kph)	용량 (pcphpl)
2	고속도로	연속류	2차로 이하	0.55	2.09	95.2	1,786
4	도로		3차로 이상	0.57	2.07	108.2	1,987
10	비연속류 도로	≤ 0.3	1차로	0.51	2.82	67.5	1,090
12			2차로 이상	0.65	2.24	82.3	1,400
14		≤ 0.7	1차로	0.54	2.16	65	925
16			2차로 이상	0.72	2.14	80.7	1,188
18		≤ 1.0	1차로	0.59	1.87	62.8	767
20			2차로 이상	0.73	1.82	72.2	971
22		≤ 2.0	1차로	0.63	1.87	58.1	583
24			2차로 이상	0.8	1.81	70	831
26		≤ 4.0	1차로	0.68	1.79	54.4	580
28			2차로 이상	0.82	1.72	69.3	756
30		> 4.0	1차로	0.72	1.72	44.2	465
32			2차로 이상	0.83	1.7	60	736

자료: 한국도로공사, “교통수요 분석 기초자료 배포 설명자료”, 2016

4.2. 편익 우선순위 선정

총 7개의 대상사업에 대한 통행배정을 수행하여 개별 사업 시행시의 편익을 산정하고 이에 따른 편익 우선순위를 선정한다.

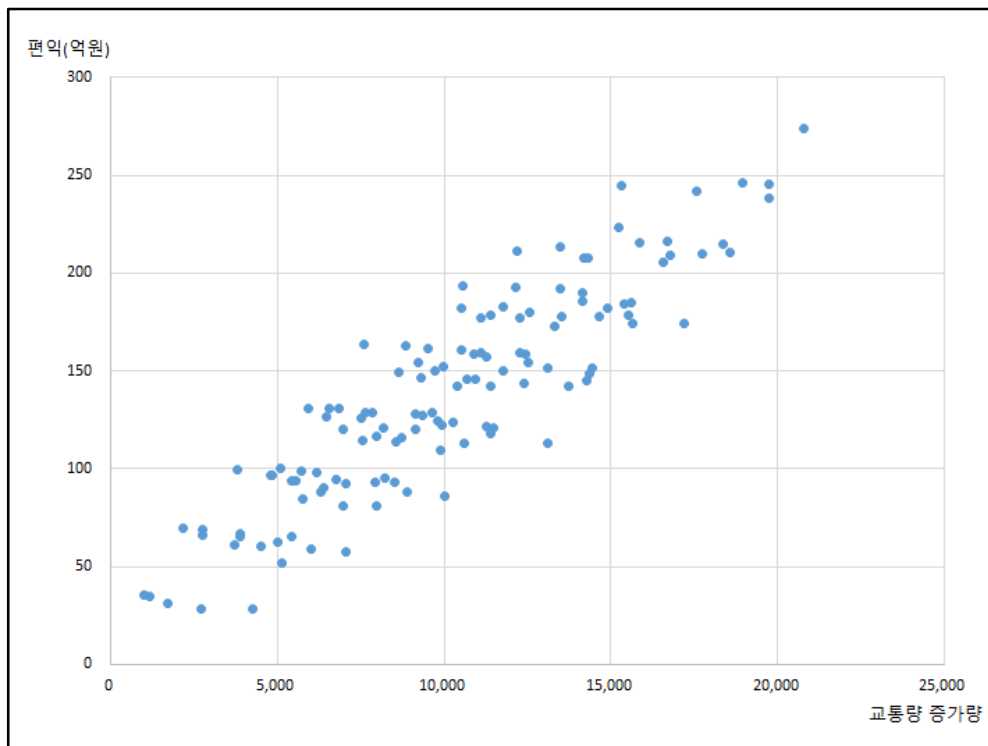
[표 IV-4] 편익 우선순위 선정결과

Link	Benefit	Cost	B/C	편익 우선순위
5	61.46	27.55	2.23	1
6	35.82	19.68	1.82	3
7	30.92	23.62	1.31	5
8	28.40	19.68	1.44	6
9	28.36	15.74	1.80	7
14	51.53	27.55	1.87	2
16	34.59	23.62	1.46	4

4.3. 지표별 우선순위 선정

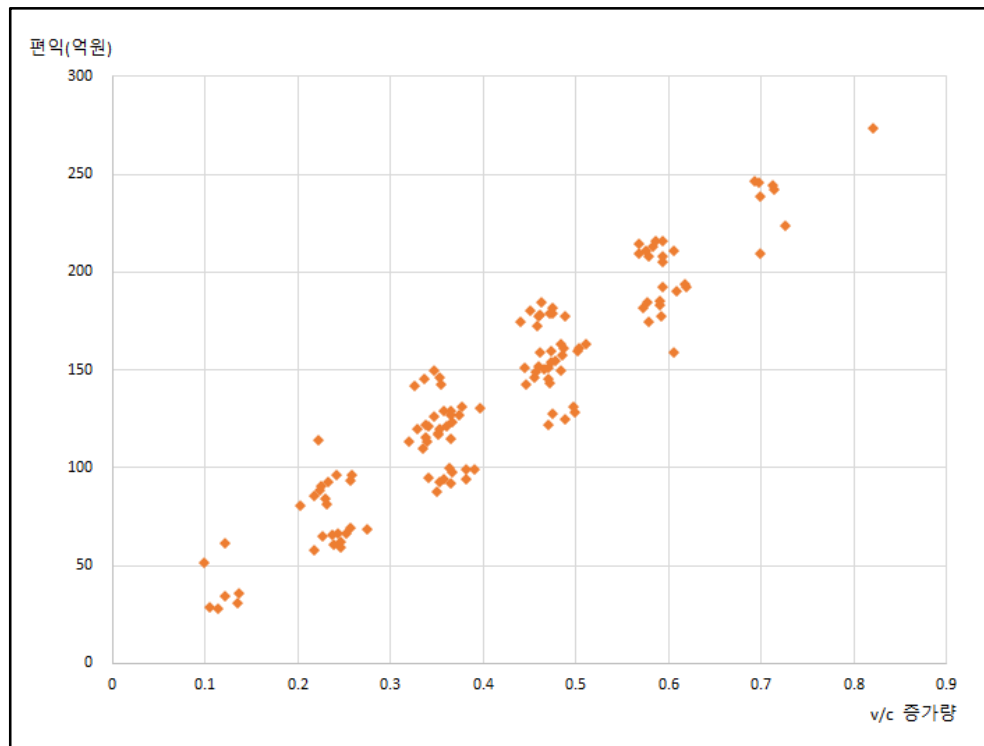
사업시행으로 교통량, 통행시간 등 교통패턴의 변화가 발생하며, 이에 따른 효과로 편익이 발생하므로 편익과 밀접한 관계를 가지고 있는 정량적 지표인 교통량, v/c , 통행시간의 변화량과 편익의 관계에 대하여 분석을 수행한다.

사업시행에 따른 대상사업들의 교통량 증가량과 편익의 분석결과 비례하는 것으로 나타났으며, 사업시행으로 인한 개선효과인 교통량 증대로 대상사업들 외 링크에서의 유입효과가 나타나 통행시간 감소, 통행속도 증가 등으로 네트워크 전체의 편익이 증대되는 것으로 판단된다.



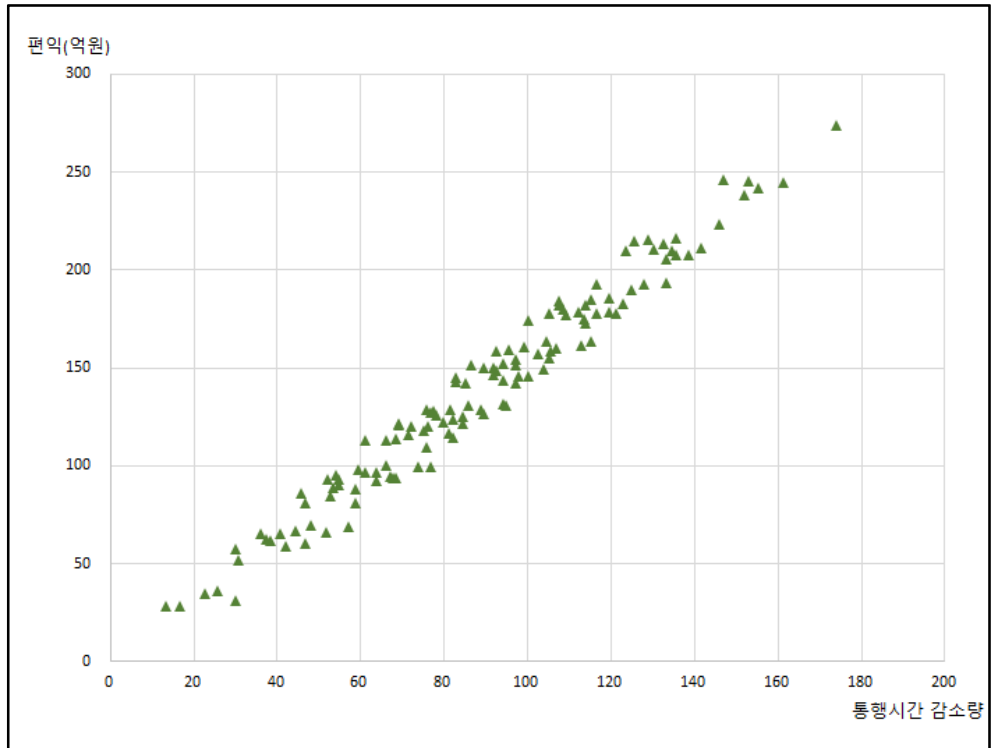
[그림 IV-2] 교통량 증가량-편익 분석

대상사업들의 v/c 증가량과 편익의 분석결과 역시 비례하는 것으로 분석 되었으며, 사업시행으로 인한 개선효과인 교통량 증가로 네트워크의 편익이 증가하고 시행사업의 수(1~7개)에 따라 용량감소 효과의 차이가 나타나 시행사업 개수별로 구분이 되어 나타나는 것을 확인하였다.



[그림 IV-3] v/c 증가량-편익 분석

사업시행에 따른 대상사업들의 통행시간 감소량과 편익의 분석결과 또한 비례하는 것으로 나타났으며, 통행시간 절감 편익에 끼치는 영향으로 전체 네트워크의 편익이 증대되며 세 지표 중 가장 편익과 밀접한 관계를 가지는 것으로 분석되어 편익에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.



[그림 IV-4] 통행시간 변화량-편익 분석

정량적 지표인 교통량, v/c , 통행시간의 변화량과 편익의 관계에 대한 분석결과 모든 지표는 편익과 비례하는 것으로 나타나며 이를 이용하여 개별적 분석이 아닌 상호관계에 대한 영향을 파악하고 영향의 정도에 따른 우선순위를 산정하여 대안 선정에 이용한다.

4.4. 네트워크 상태별 분석

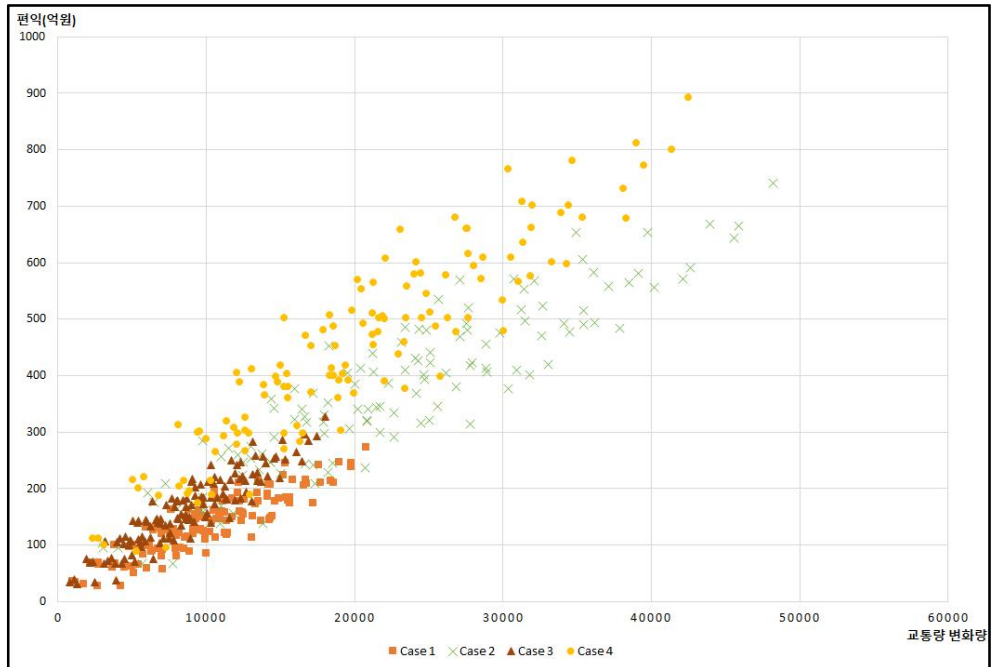
분석 Toy Network 상의 대상사업인 고속도로와 우회도로인 국도의 용량상태에 따라 정량적 지표인 교통량, v/c , 통행시간의 변화량과 편익의 관계에 대한 변화를 분석한다.

기존의 네트워크 상태에서 고속도로와 국도의 용량이 20% 감소된 상황을 Case로 구분하여 네트워크 상태에 따른 지표별 편익관의 관계에 대한 패턴 변화를 확인하였다.

[표 IV-5] 네트워크 분석 시나리오

네트워크 상태		고속도로 용량	
		100%	80%
국도 용량	100%	Case 1	Case 2
	80%	Case 3	Case 4

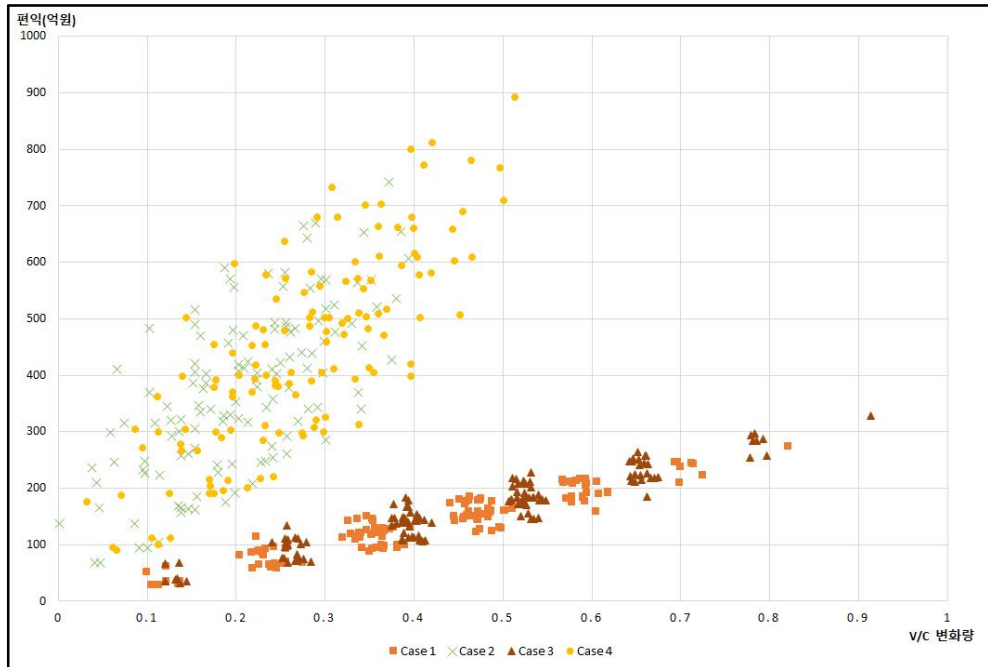
교통량 변화량과 편익 분석결과 고속도로 용량 감소의 경우인 Case 2, Case 4의 편익이 크게 증가하였으며, 국도 용량 감소인 Case 3의 경우는 소폭 증가하는 것으로 나타났다. 이는 대상사업구간이고 네트워크 상 상위 등급의 도로인 고속도로가 국도에 비해 편익에 미치는 영향이 크다는 것을 나타낸다.



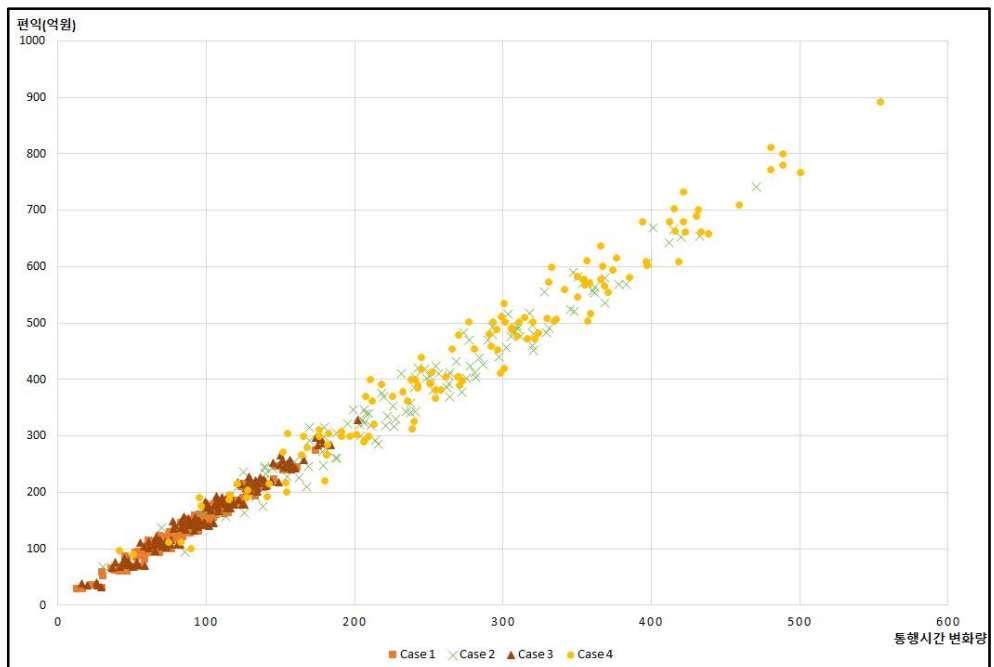
[그림 IV-5] 교통량 변화와 편익간의 관계

v/c 변화량, 통행시간 변화량의 경우도 교통량 변화량과 마찬가지로 Case 2, Case 4의 편익이 크게 증가하고 Case 3의 경우는 소폭 증가하는 것으로 나타났다.

네트워크 상태별 분석을 통해 Case별 편익의 차이는 발생하나 그 패턴은 유사한 것으로 분석되었으며, 대상사업구간의 네트워크 상태가 편익에 미치는 영향이 큰 것으로 나타나 명확한 기준에 의거한 대상사업의 선정이 중요한 것으로 판단된다.



[그림 IV-6] V/C 변화와 편익간의 관계



[그림 IV-7] 통행시간 변화와 편익간의 관계

4.5. 네트워크 최대편익 대안 선정

유지보수로 인한 수요전환과 이에 따른 혼잡 변동 등이 발생하여 개별 사업에 대한 평가가 아닌 도로간 상호관계를 고려한 네트워크 최대편익 대안을 선정한다.

대상사업의 시행 유무에 따른 대안을 선정하고 통행배정을 통한 네트워크 측면의 대안별 편익, 비용을 산정하였다.

또한, 링크간 상호관계의 영향을 파악하기 위하여 2개 사업 이상의 대안에 대하여 실제 분석된 동시 시행시의 편익과 개별사업 합산편익의 차이를 비교 분석결과 상호관계로 인해 개별사업 분석 결과와의 편익의 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

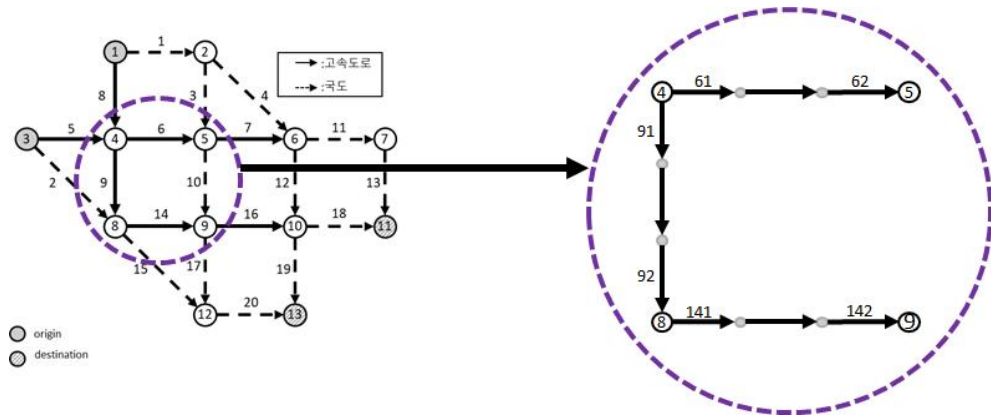
인접 또는 동일 축상의 링크들이 조합된 대안은 상호관계가 (+)의 효과가 보이며, 분기되는 노드 4를 기점으로 두 축간의 링크들 조합 대안은 (-)의 효과를 나타내는 것으로 분석되었다. 이는 네트워크 측면에서의 분석시 링크간 상호관계가 존재하며 링크간의 관계에 따라 그 효과가 증대 또는 감소할 수 있고 그 영향의 정도가 다르게 나타나는 것을 확인하였다.

[표 IV-6] Toy Network 분석 결과

대 안	Link							Benefit (A)	Cost	B/C	개별사업 합산 편익 (B)	편익 차 (A)-(B)
	5	6	7	8	9	14	16					
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	O	-	-	-	-	-	-	61.46	27.55	2.23	61.46	-
3	-	O	-	-	-	-	-	35.82	19.68	1.82	35.82	-
4	-	-	O	-	-	-	-	30.92	23.62	1.31	30.92	-
5	-	-	-	O	-	-	-	28.40	19.68	1.44	28.40	-
6	-	-	-	-	O	-	-	28.36	15.74	1.80	28.36	-
7	-	-	-	-	-	O	-	51.53	27.55	1.87	51.53	-
8	-	-	-	-	-	-	O	34.59	23.62	1.46	34.59	-
9	O	O	-	-	-	-	-	97.48	47.23	2.06	97.29	0.19
10	O	-	O	-	-	-	-	93.54	51.17	1.83	92.38	1.16
11	-	O	O	-	-	-	-	68.79	43.30	1.59	66.74	2.05
12	O	-	-	O	-	-	-	90.38	47.23	1.91	89.87	0.52
13	-	O	-	O	-	-	-	66.80	39.36	1.70	64.23	2.58
14	-	-	O	O	-	-	-	60.46	43.30	1.40	59.32	1.14
15	O	-	-	-	O	-	-	92.99	43.30	2.15	89.83	3.16
16	-	O	-	-	O	-	-	62.29	35.42	1.76	64.19	-1.90
17	-	-	O	-	O	-	-	59.00	39.36	1.50	59.28	-0.28
18	-	-	-	O	O	-	-	57.81	35.42	1.63	56.77	1.04
19	O	-	-	-	-	O	-	113.95	55.10	2.07	112.99	0.96
20	-	O	-	-	-	O	-	84.52	47.23	1.79	87.35	-2.83
21	-	-	O	-	-	O	-	81.24	51.17	1.59	82.45	-1.20
22	-	-	-	O	-	O	-	80.81	47.23	1.71	79.93	0.88
23	-	-	-	-	O	O	-	85.76	43.30	1.98	79.89	5.87
24	O	-	-	-	-	-	O	96.41	51.17	1.88	96.05	0.36
25	-	O	-	-	-	-	O	69.44	43.30	1.60	70.41	-0.97
26	-	-	O	-	-	-	O	66.17	47.23	1.40	65.51	0.66
27	-	-	-	O	-	-	O	65.10	43.30	1.50	62.99	2.11
28	-	-	-	-	O	-	O	65.44	39.36	1.66	62.95	2.49
29	-	-	-	-	-	O	O	88.51	51.17	1.73	86.12	2.39

O: 사업시행, -:사업미시행

상호관계 상세 분석을 위하여 상호 영향이 가장 크게 나타난 링크 6, 9, 14를 세분화하여 도로공사의 실측자료를 토대로 동일한 길이(400m)인 각 링크별 2개 구간을 선정하고 동일한 초기상태, 비용을 기준으로 상호관계에 대한 상세 분석을 수행하였다.



[그림 IV-8] Toy Network 세분화

분할된 링크간은 링크 6, 9, 14의 전체 링크 분석결과와 유사한 상호관계가 나타났으며, 2개 수행사업 선정시 편익 우선순위/상호관계 분석이 동일한 결과(대안 22)가 도출된다.

3개 사업 선정시 편익 우선순위는 링크 61(or 62)가 포함된 대안 32(or 38)가 선정되나 상호관계 고려시 보완관계의 91(or 92)가 포함되어 대안 41(or 42)로 최대 편익의 대안이 선정된다.

따라서, 각 대상사업별 편익 차이가 크지 않을 경우 상호관계의 영향으로 우선순위 방법과의 차이가 증가할 것으로 판단된다.

[표 IV-7] Toy Network 세분화 분석결과

대안	Link						Benefit (A)	Cost	B/C	개별 합산 편익 (B)	편익 차 (A)-(B)	편익 우선 순위	사업 선정
	6		9		14								
	61	62	91	92	141	142							
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2	O	-	-	-	-	-	4.40	1.57	2.79	4.40	-	3	
3	-	O	-	-	-	-	4.40	1.57	2.79	4.40	-	3	
4	-	-	O	-	-	-	4.31	1.57	2.74	4.31	-	5	
5	-	-	-	O	-	-	4.31	1.57	2.74	4.31	-	5	
6	-	-	-	-	O	-	4.48	1.57	2.85	4.48	-	1	
7	-	-	-	-	-	O	4.48	1.57	2.85	4.48	-	1	
8	O	O	-	-	-	-	9.67	3.15	3.07	8.80	0.88		
9	O	-	O	-	-	-	8.35	3.15	2.65	8.71	-0.35		
10	O	-	-	O	-	-	8.35	3.15	2.65	8.71	-0.35		
11	O	-	-	-	O	-	8.66	3.15	2.75	8.88	-0.22		
12	O	-	-	-	-	O	8.66	3.15	2.75	8.88	-0.22		
13	-	O	O	-	-	-	8.35	3.15	2.65	8.71	-0.35		
14	-	O	-	O	-	-	8.35	3.15	2.65	8.71	-0.35		
15	-	O	-	-	O	-	8.66	3.15	2.75	8.88	-0.22		
16	-	O	-	-	-	O	8.66	3.15	2.75	8.88	-0.22		
17	-	-	O	O	-	-	9.39	3.15	2.98	8.62	0.77		
18	-	-	O	-	O	-	9.76	3.15	3.10	8.79	0.97		
19	-	-	O	-	-	O	9.76	3.15	3.10	8.79	0.97		
20	-	-	-	O	O	-	9.76	3.15	3.10	8.79	0.97		
21	-	-	-	O	-	O	9.76	3.15	3.10	8.79	0.97		
22	-	-	-	-	O	O	9.94	3.15	3.16	8.96	0.98		◎
23	O	O	O	-	-	-	12.92	4.72	2.74	13.10	-0.18		
24	O	O	-	O	-	-	12.92	4.72	2.74	13.10	-0.18		
25	O	O	-	-	O	-	12.70	4.72	2.69	13.28	-0.58		
26	O	O	-	-	-	O	12.70	4.72	2.69	13.28	-0.58		
27	O	-	O	O	-	-	13.11	4.72	2.77	13.01	0.09		
28	O	-	O	-	O	-	13.27	4.72	2.81	13.19	0.08		
29	O	-	O	-	-	O	13.27	4.72	2.81	13.19	0.08		
30	O	-	-	O	O	-	13.27	4.72	2.81	13.19	0.08		
31	O	-	-	O	-	O	13.27	4.72	2.81	13.19	0.08		
32	O	-	-	-	O	O	13.44	4.72	2.85	13.36	0.08		
33	-	O	O	O	-	-	13.11	4.72	2.77	13.01	0.09		
34	-	O	O	-	O	-	13.27	4.72	2.81	13.19	0.08		
35	-	O	O	-	-	O	13.27	4.72	2.81	13.19	0.08		
36	-	O	-	O	O	-	13.27	4.72	2.81	13.19	0.08		
37	-	O	-	O	-	O	13.27	4.72	2.81	13.19	0.08		
38	-	O	-	-	O	O	13.44	4.72	2.85	13.36	0.08		
39	-	-	O	O	O	-	13.20	4.72	2.79	13.10	0.10		
40	-	-	O	O	-	O	13.20	4.72	2.79	13.10	0.10		
41	-	-	O	-	O	O	13.93	4.72	2.95	13.27	0.66		
42	-	-	-	O	O	O	13.93	4.72	2.95	13.27	0.66		◎

O: 사업시행, -:사업미시행

[표 IV-8] Toy Network 세분화 대안선정 결과

대안	Link						Benefit (A)	Cost	B/C	편의 우선 순위	교통량 변화량	v/c 변화량	통행시간 변화량	최대편의 대안
	6		9		14									
	61	62	91	92	141	142								
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
2	0	-	-	-	-	-	4.40	1.57	2.79	3	5	5	5	
3	-	0	-	-	-	-	4.40	1.57	2.79	3	5	5	5	
4	-	-	0	-	-	-	4.31	1.57	2.74	5	1	3	3	
5	-	-	-	0	-	-	4.31	1.57	2.74	5	1	3	3	
6	-	-	-	-	0	-	4.48	1.57	2.85	1	3	1	1	
7	-	-	-	-	-	0	4.48	1.57	2.85	1	3	1	1	
8	0	0	-	-	-	-	9.67	3.15	3.07					
9	0	-	0	-	-	-	8.35	3.15	2.65					
10	0	-	-	0	-	-	8.35	3.15	2.65					
11	0	-	-	-	0	-	8.66	3.15	2.75					
12	0	-	-	-	-	0	8.66	3.15	2.75					
13	-	0	0	-	-	-	8.35	3.15	2.65		◎			
14	-	0	-	0	-	-	8.35	3.15	2.65					
15	-	0	-	-	0	-	8.66	3.15	2.75					
16	-	0	-	-	-	0	8.66	3.15	2.75					
17	-	-	0	0	-	-	9.39	3.15	2.98					
18	-	-	0	-	0	-	9.76	3.15	3.10					
19	-	-	0	-	-	0	9.76	3.15	3.10					
20	-	-	-	0	0	-	9.76	3.15	3.10					
21	-	-	-	0	-	0	9.76	3.15	3.10					
22	-	-	-	-	0	0	9.94	3.15	3.16	◎		◎	◎	◎
23	0	0	0	-	-	-	12.92	4.72	2.74					
24	0	0	-	0	-	-	12.92	4.72	2.74					
25	0	0	-	-	0	-	12.70	4.72	2.69					
26	0	0	-	-	-	0	12.70	4.72	2.69					
27	0	-	0	0	-	-	13.11	4.72	2.77					
28	0	-	0	-	0	-	13.27	4.72	2.81					
29	0	-	0	-	-	0	13.27	4.72	2.81					
30	0	-	-	0	0	-	13.27	4.72	2.81					
31	0	-	-	0	-	0	13.27	4.72	2.81					
32	0	-	-	-	0	0	13.44	4.72	2.85	◎				
33	-	0	0	0	-	-	13.11	4.72	2.77		◎			
34	-	0	0	-	0	-	13.27	4.72	2.81					
35	-	0	0	-	-	0	13.27	4.72	2.81					
36	-	0	-	0	0	-	13.27	4.72	2.81					
37	-	0	-	0	-	0	13.27	4.72	2.81					
38	-	0	-	-	0	0	13.44	4.72	2.85					
39	-	-	0	0	0	-	13.20	4.72	2.79					
40	-	-	0	0	-	0	13.20	4.72	2.79					
41	-	-	0	-	0	0	13.93	4.72	2.95					
42	-	-	-	0	0	0	13.93	4.72	2.95			◎	◎	◎

O: 사업시행, -:사업미시행

4.6. 예산별 분석

우리나라의 고속도로 관리연장 중 노후연장의 비율은 점차 증가하고 있으며 이에 따라 필요 예산은 증가하고 있으나 필요예산 대비 배정예산의 비율은 점차로 감소하고 있는 실정이다. 따라서 한정된 예산 내에서의 경제성을 최대로 보장할 수 있는 최대 편익의 사업을 선정하는 것이 중요하다.

기존의 도로공사 산정식을 이용한 우선순위 방법과 본 연구에서 제시한 개별편익, 지표별 변화량에 따른 우선순위 선정 방안, 네트워크 총 편익의 최대화 방법을 이용하여 각 예산별 선정대안의 편익을 비교 분석한다.

기 분석된 각 항목별 우선순위를 정리하면 아래와 같다.

교통량이 가장 많고 편익이 가장 높았던 링크 5가 모든 항목에서 1순위로 선정되었으며, 각 항목별 산정방안을 토대로 우선순위를 선정하여 예산별 분석을 수행하였다.

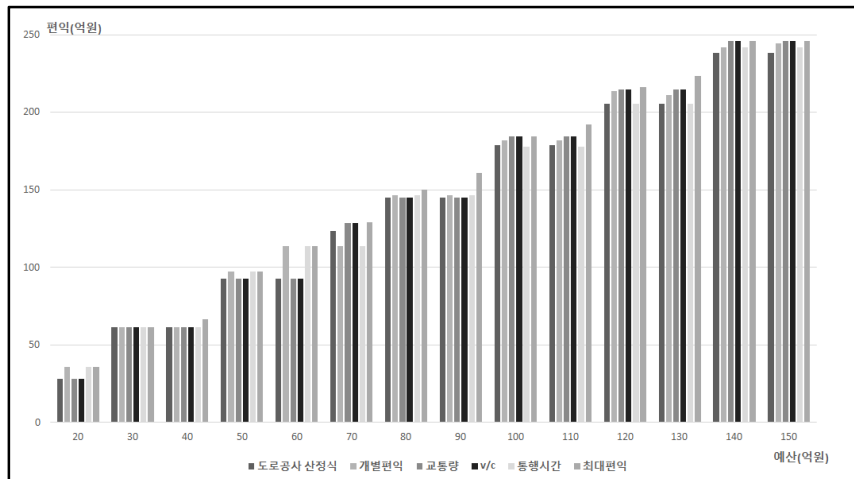
[표 IV-9] 항목별 우선순위 선정결과

링크번호	우선순위				
	도로공사 산정식	개별편익	교통량 변화량	v/c 변화량	통행시간 변화량
5	1	1	1	1	1
6	5	3	6	6	3
7	4	5	7	7	5
8	6	6	5	5	7
9	2	7	2	2	4
14	3	2	3	3	2
16	7	4	4	4	6

[표 IV-10] 예산별 분석결과

예산 (억원)	도로공사 산정식	개별편익	교통량 변화량	v/c 변화량	통행시간 변화량	최대편익
20	28.36	35.82	28.36	28.36	35.82	35.82
30	61.46	61.46	61.46	61.46	61.46	61.46
40	61.46	61.46	61.46	61.46	61.46	66.80
50	92.99	97.48	92.99	92.99	97.48	97.48
60	92.99	113.95	92.99	92.99	113.95	113.95
70	123.54	113.95	128.78	128.78	113.95	128.91
80	145.27	146.39	145.27	145.27	146.39	149.98
90	145.27	146.39	145.27	145.27	146.39	160.85
100	178.73	182.06	184.48	184.48	177.94	184.48
110	178.73	182.06	184.48	184.48	177.94	192.40
120	205.51	213.44	214.52	214.52	205.51	216.06
130	205.51	210.99	214.52	214.52	205.51	223.53
140	238.53	242.05	246.20	246.20	242.05	246.20
150	238.53	244.48	246.20	246.20	242.05	246.20
평균	142.63	146.57	146.21	146.21	144.85	151.72
최대편익 대비 비율(%)	94.01	96.60	96.37	96.37	95.47	100.00

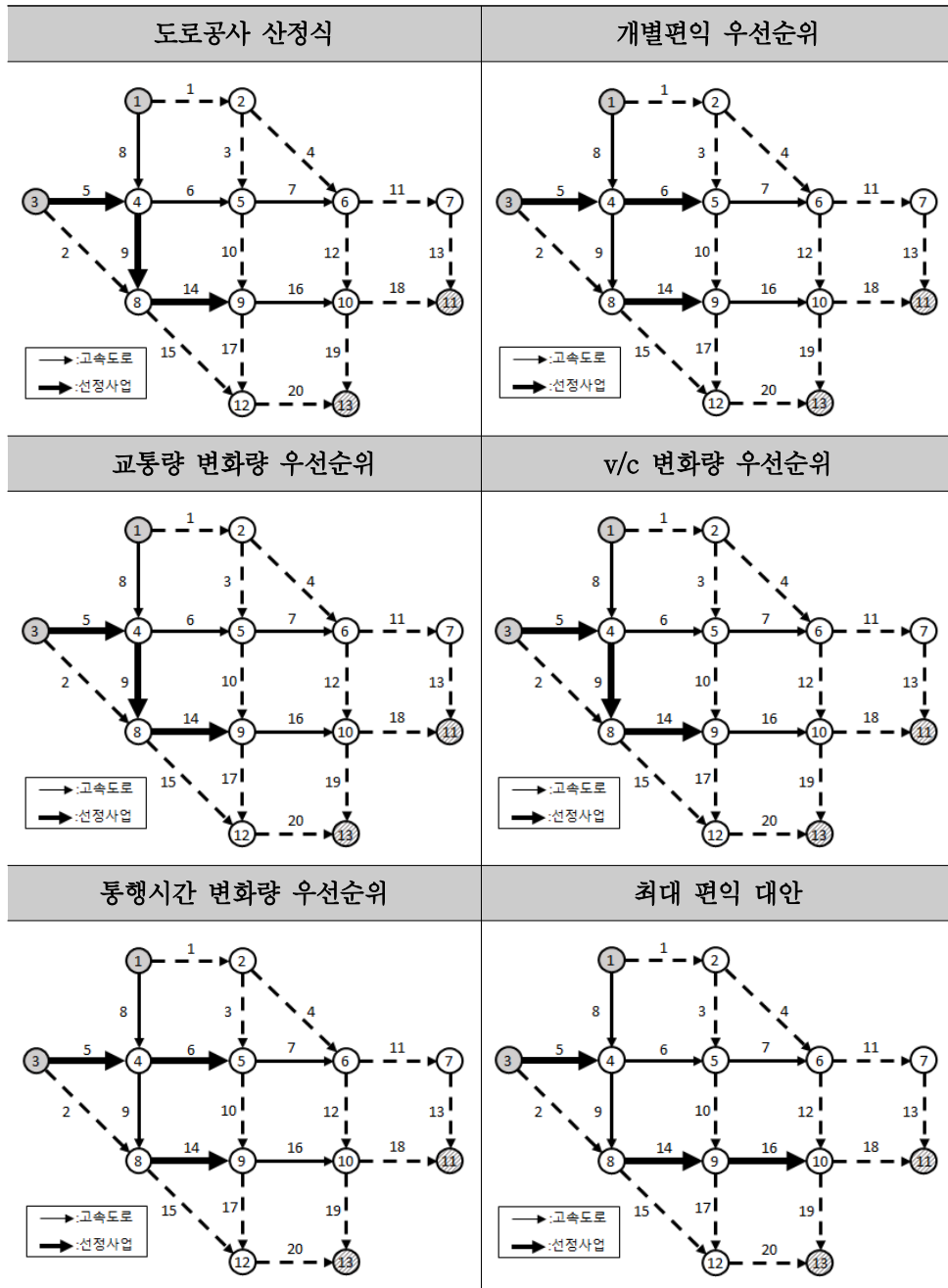
분석 결과 예산별 최대 편익에 비해 각 항목별 우선순위 분석 결과는 평균 94.01~96.6% 수준의 대안이 선정되어 사업효과가 감소하는 것으로 나타났으며, 상호관계를 고려하여 최대 편익의 대안을 선정하는 것이 경제적 측면에서의 효율성을 높일 수 있다.



[그림 IV-9] 예산별 분석 총괄

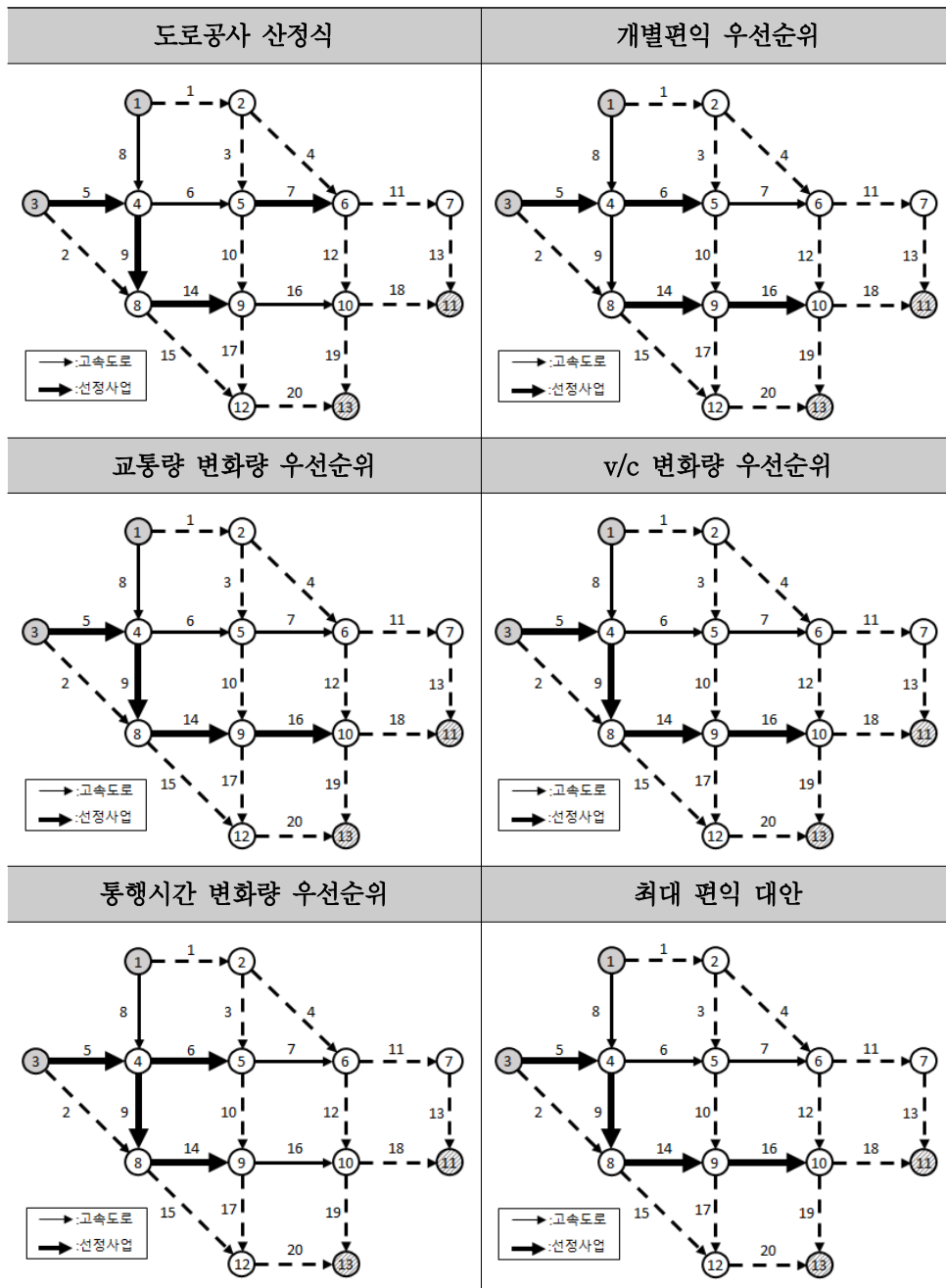
총 예산이 80억일 경우 링크 5, 14, 16이 최대 편익 대안으로 선정되었고 개별편익, 통행시간 변화량 우선순위 선정 시 링크 5, 6, 14이 차순위의 편익으로 분석되었다.

[표 IV-11] 항목별 분석결과(예산 80억)



예산이 100억의 경우 각 항목별 4개의 링크가 선정되었고 최대 편익 대안인 링크 5, 9, 14, 16이 교통량, v/c 변화량 우선순위 분석시와 동일한 결과가 도출되었다.

[표 IV-12] 항목별 분석결과(예산 100억)



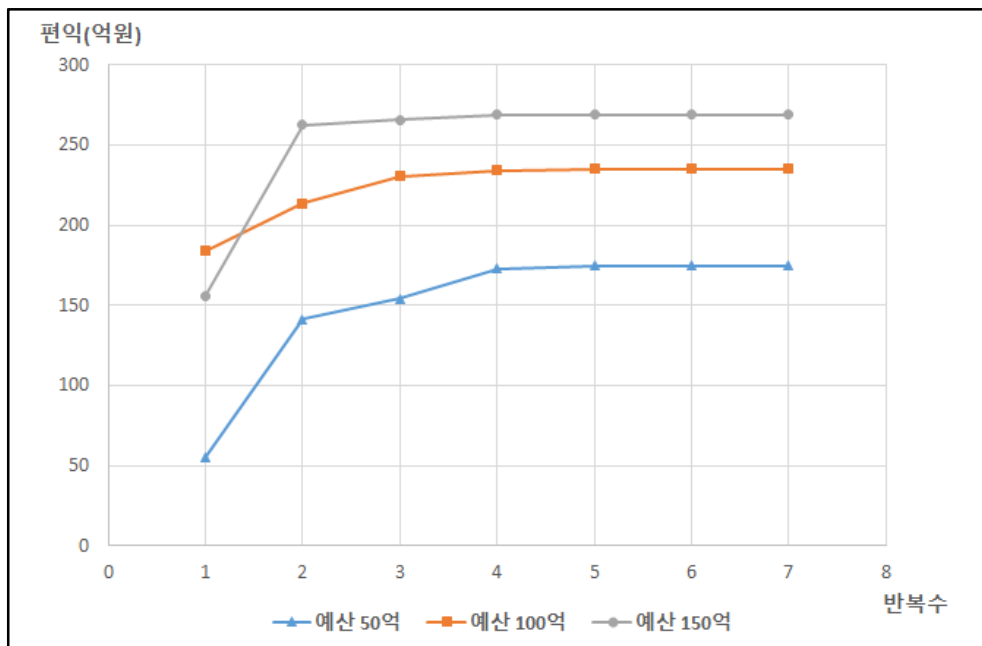
4.7. 유전자 알고리즘

한정된 예산 내에서의 네트워크 편익 최대화 방안은 최대 편익을 대안을 선정할 수 있으나 대상사업의 수의 증가, 공사규모 다양화 등의 경우 복잡도의 문제가 발생하여 분석 시간의 기하급수적인 증가가 나타난다. 이를 해결하기 위한 방안으로 유전자 알고리즘을 적용하여 최적 대안을 선정하였으며 전역해와의 결과비교를 통해 알고리즘을 검증하였다.

또한, 단계별 공사규모를 반영하여 예산의 잉여문제를 해소하고 실제 예산 집행 방안을 현실화하였다.

4.7.1. 예산별 분석

예산별 유전자 알고리즘 분석 수행결과 편익이 최대화되는 방향으로 수렴하는 것을 확인하였으며 10억원 단위로 예산을 세분화하여 각 예산별 최대 편익 대안을 선정하였다.



[그림 IV-10] 유전자 알고리즘 수렴결과

예산별 분석결과 항목별 우선순위 선정시 1순위였던 링크 5와 상호 영향이 가장 크게 나타난 링크 6, 9, 14가 타 링크에 비해 우선적으로 대안에 선정되었다.

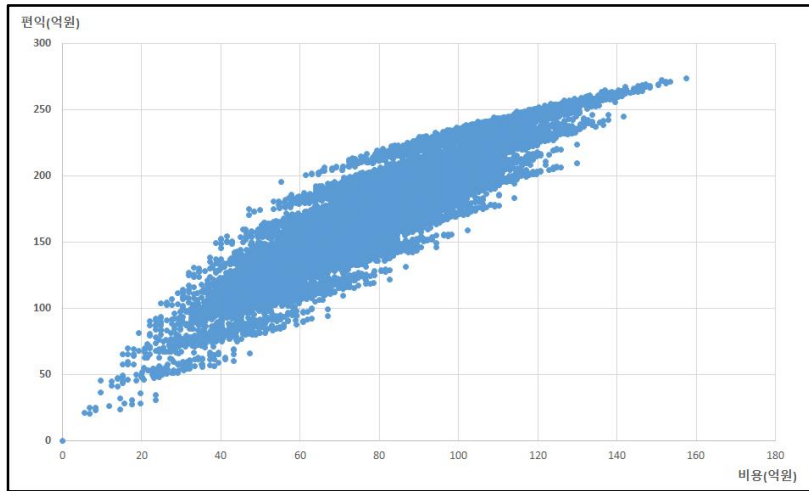
[표 IV-13] 예산별 유전자 알고리즘 선정 대안

예산 (억원)	선정대안							ben	cost
	5	6	7	8	9	14	16		
50	3	3	5	3	3	3	3	174.72	47.02
60	3	3	3	3	3	3	3	195.55	55.32
70	3	2	3	3	2	3	3	206.70	69.23
80	2	1	3	3	3	3	3	216.76	78.90
90	2	1	3	3	3	2	3	227.37	89.72
100	1	2	3	2	3	2	3	235.19	99.46
110	1	2	3	3	1	1	3	244.13	109.00
120	1	1	3	1	1	2	3	250.67	119.75
130	1	1	3	3	1	1	1	258.30	129.36
140	1	1	3	2	1	1	1	264.35	137.08
150	1	1	2	1	2	1	1	269.12	147.36

4.7.2. 전역해 비교 분석

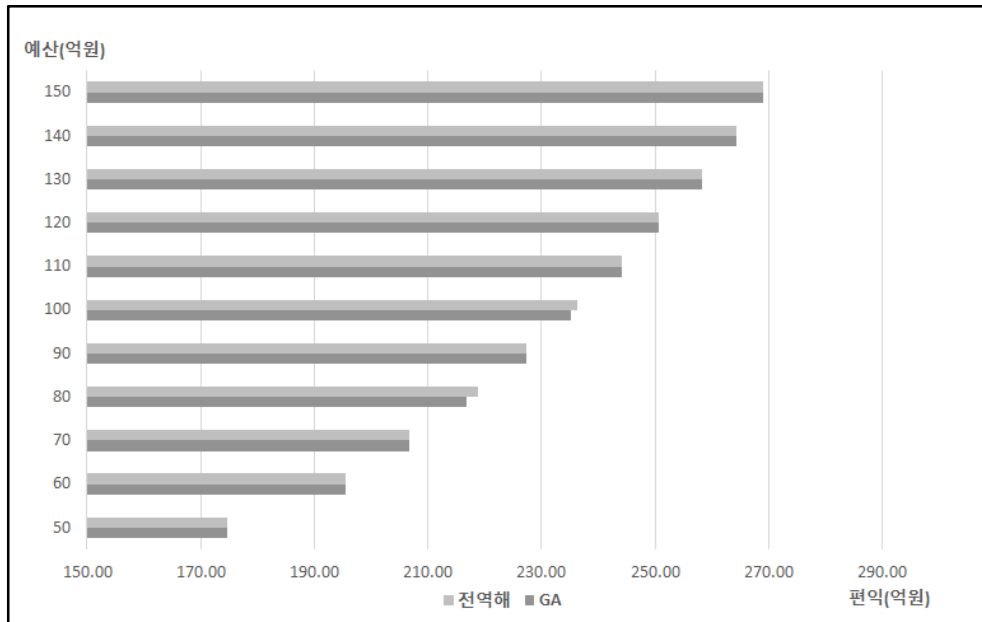
유전자 알고리즘 적용 방안의 검증을 위하여 대상사업 7개 링크의 공사규모별 전역해를 산정하여 비교 분석을 수행한다.

전역해 분석결과 유지보수 비용에 따라 편익은 증가하는 것으로 나타나며 그 증가율은 점차 완화되는 것으로 분석되었다.



[그림 IV-11] 비용-편익 분석결과(전역해)

각 예산별 전역해와 유전자 알고리즘 방안 선정 대안과의 비교결과 예산 80억 1%, 100억 0.5%를 제외한 예산에서 모두 일치하여 네트워크 확장에 따른 현실적 전역해 탐색이 불가능한 상황에서의 유전자 알고리즘 이용 분석의 가능성을 확인하였다.



[그림 IV-12] 유전자 알고리즘 선정대안과 전역해 비교

4.8. 분석결과

Nguyen & Dupuis Network를 수정하여 고속도로와 국도로 구분된 Toy Network를 이용하여 분석을 수행하였다.

개별사업의 편익을 산정하여 개별사업 편익 우선순위를 선정하고 사업 시행에 따른 편익과 밀접한 관계를 가지고 있는 교통량, v/c , 통행시간 변화량을 검토하였다. 검토결과 지표별 변화량과 편익과의 관계를 확인하고 상호관계에 대한 영향을 고려하여 지표별 변화에 따른 우선순위를 선정하였다. 또한, 네트워크 상태에 따른 분석을 통해 통행패턴의 변화를 분석하여 대상사업의 상태가 편익이 미치는 영향이 크게 나타나는 것을 확인하여 명확한 기준에 의거한 대상사업의 선정이 중요할 것으로 판단된다.

네트워크 최대편익 대안 선정으로 링크간 상호관계가 존재하고 그 효과로 인해 최대 편익의 대안이 달라지는 것을 확인하였으며, 상세 분석을 통해 대상사업별 편익의 차이가 크지 않을 경우 상호관계의 영향이 증가하여 우선순위 방법과의 차이가 증가할 것으로 예상된다.

선정된 항목별 우선순위 방안과 네트워크 최대편익 대안의 예산별 대안선정 결과를 비교하고 상호관계를 고려한 최대 편익의 대안을 선정하는 것이 경제적 측면에서의 효율성을 높일 수 있는 것을 확인하였다.

네트워크 확장 등의 복잡도 문제 발생으로 인해 대안 선정에 유전자 알고리즘을 적용하였으며, 알고리즘의 수렴을 확인하고 전역해와의 검증을 수행하였다. 각 예산별 전역해와 유전자 알고리즘 방안 선정 대안과의 비교결과 전역해에 근접하는 것을 검증하고 네트워크 확장에 따른 현실적 전역해 탐색이 불가능한 상황에서의 유전자 알고리즘 이용 분석의 가능성을 확인하였다.

5. 실제 네트워크 분석

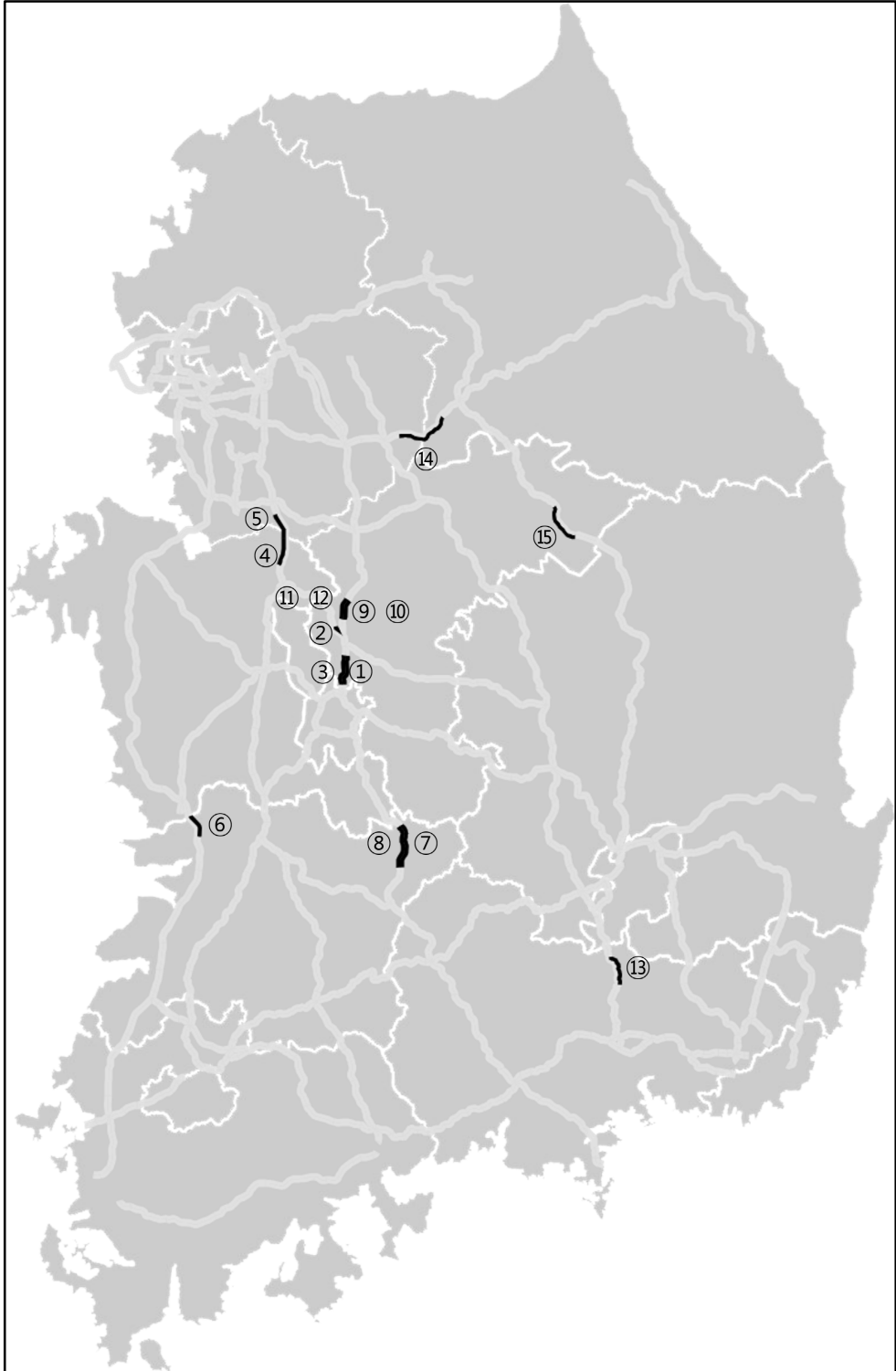
5.1. 분석 자료

한국도로공사에서 조사한 실제 data를 이용하여 우선순위 산정식을 이용한 대안 선정과 상호관계 고려시의 결과를 비교하고 차이점과 상호관계 고려로 인한 개선효과를 검토한다.

조사지점 중 자료 누락이 없고 우선순위가 높은 순으로 15개 링크를 대상으로 분석한다.

[표 V-1] 실제 네트워크 분석 대상사업

번호	노선명	구간	차로수	연장	HPCI	도로공사 산정식 우선순위
1	경부선	신탄진IC-남청주IC	4	0.4	3.41	12
2	경부선	남이JC-청주IC	3	0.4	3.42	15
3	경부선	남청주IC-신탄진IC	4	0.4	3.42	10
4	경부선	북천안IC-천안IC	4	0.4	3.27	8
5	경부선	안성IC-북천안IC	4	0.4	2.83	3
6	서해안선	동군산IC-군산IC	2	0.4	2.73	1
7	통영대전, 중부선	덕유산IC-무주IC	2	0.4	3.35	11
8	통영대전, 중부선	무주IC-덕유산IC	2	0.4	3.21	7
9	통영대전, 중부선	서청주IC-오창IC	2	0.4	3.45	14
10	통영대전, 중부선	서청주IC-오창IC	2	0.4	2.97	5
11	통영대전, 중부선	오창IC-서청주IC	2	0.4	3.46	13
12	통영대전, 중부선	오창IC-서청주IC	2	0.4	2.74	2
13	중부내륙선	영산IC-창녕IC	2	0.3	2.99	6
14	영동선	여주IC-문막IC	2	0.4	3.39	9
15	중앙선	북단양IC-단양IC	2	0.5	2.80	4



[그림 V-1] 분석 대상사업

5.2. 항목별 우선순위 선정

Toy Network 분석과 동일하게 각 항목별 우선순위를 선정하여 분석에 적용하고 유전자 알고리즘을 통한 네트워크 총 편익 최대화 대안과의 비교 분석을 수행한다.

5.2.1. 개별편익 우선순위 선정

총 15개의 대상사업에 대한 통행배정을 수행하여 개별 사업 시행시의 편익을 산정하고 이에 따른 편익 우선순위를 선정한다.

[표 V-2] 편익 우선순위 선정결과

Link	Benefit	Cost	우선순위	
			도로공사 산정식	개별편익
1	0.40	0.18	12	10
2	0.34	0.18	15	14
3	0.47	0.18	10	7
4	0.37	0.18	8	11
5	0.93	0.39	3	1
6	0.44	0.39	1	8
7	0.41	0.18	11	9
8	0.30	0.18	7	15
9	0.37	0.18	14	12
10	0.72	0.39	5	2
11	0.54	0.18	13	6
12	0.66	0.39	2	3
13	0.56	0.29	6	5
14	0.57	0.18	9	4
15	0.36	0.49	4	13

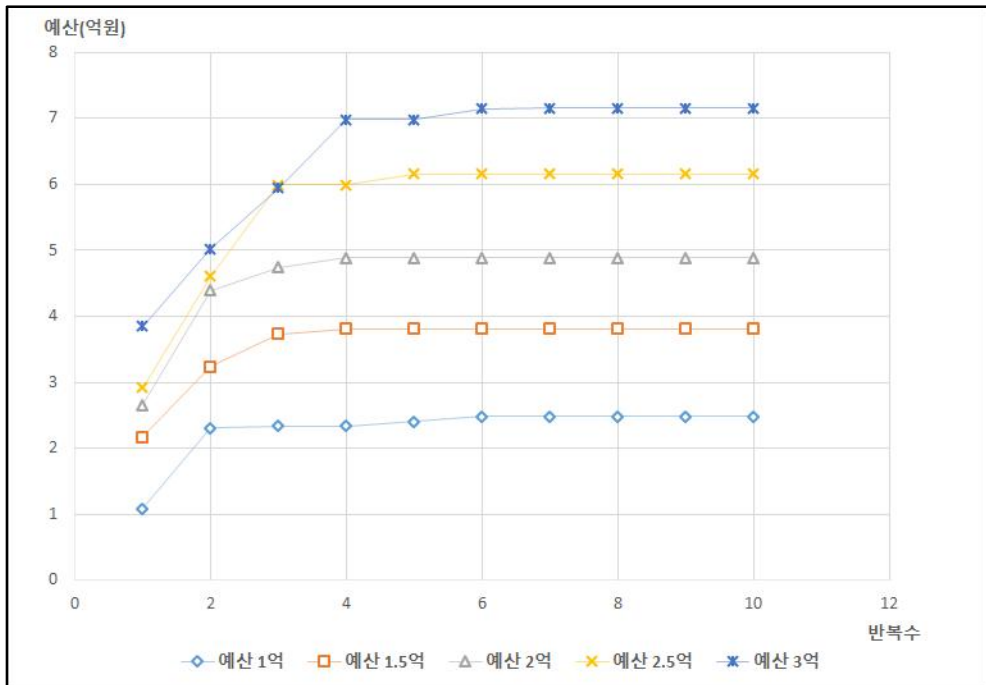
[표 V-3] 항목별 우선순위 선정결과

링크번호	우선순위				
	도로공사 산정식	개별편익	교통량 변화량	v/c 변화량	통행시간 변화량
1	12	10	4	5	5
2	15	14	5	6	9
3	10	7	3	7	8
4	8	11	2	2	2
5	3	1	1	1	1
6	1	8	11	10	12
7	11	9	14	13	13
8	7	15	12	15	15
9	14	12	8	4	4
10	5	2	7	3	3
11	13	6	10	9	7
12	2	3	9	8	6
13	6	5	13	12	11
14	9	4	6	11	10
15	4	13	15	14	14

5.3. 예산별 분석

기 선정된 항목별 우선순위에 따라 예산별 대안을 선정하여 네트워크 최대 편익의 결과와 비교 분석을 수행한다.

유전자 알고리즘 분석 수행결과 편익이 최대화되는 방향으로 수렴하는 것을 확인하였으며 0.5억원 단위로 예산을 세분화하여 각 예산별 최대 편익 대안을 선정하였다.

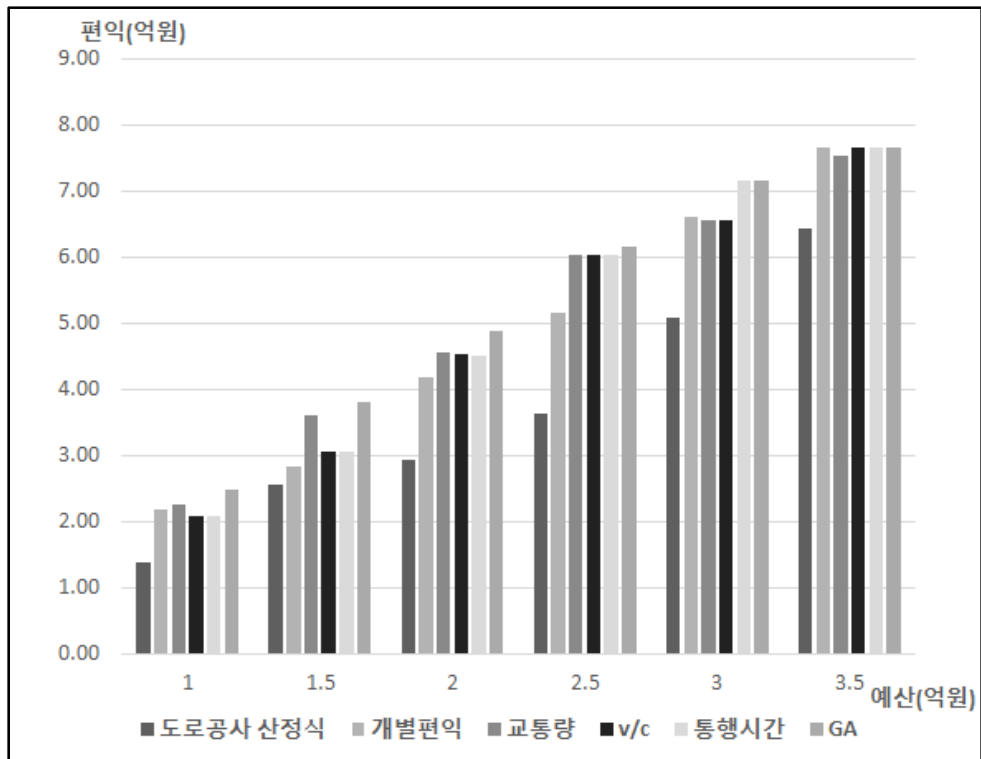


[그림 V-2] 예산별 유전자 알고리즘 분석결과

예산별 분석결과 최대 편익에 대비 각 항목별 우선순위 분석 결과는 평균 68.5~95.04% 수준의 대안이 선정되어 Toy Network 분석 시와의 차이가 나타났다. 이는 우선순위 산정시 네트워크 확장 및 실제 데이터 반영에 따라 항목별 우선순위의 차이로 판단되며, 특히 도로공사 산정식의 경우 사업 시행 후의 편익을 고려하지 않는 선정방법으로 선정대안의 편익 차이가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

[표 V-4] 예산별 분석결과

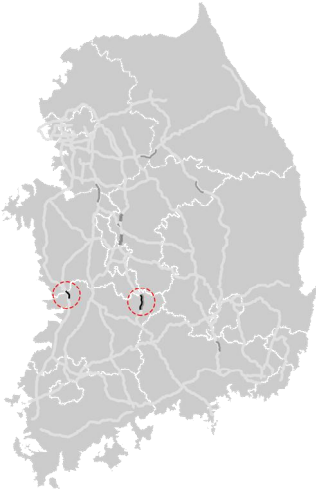
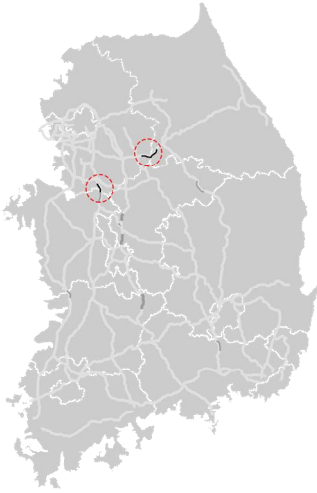
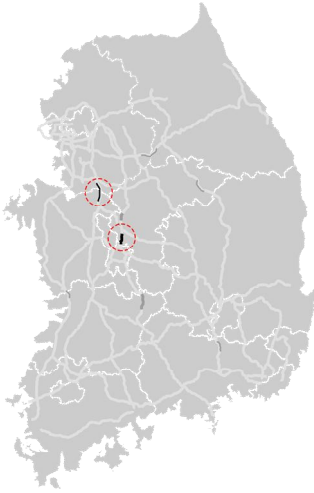
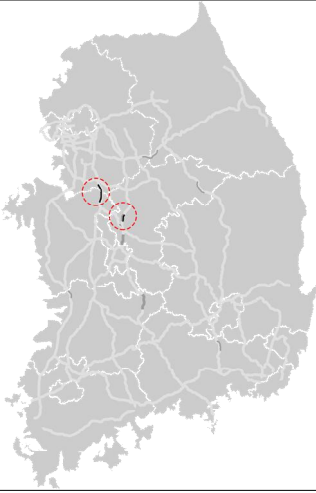
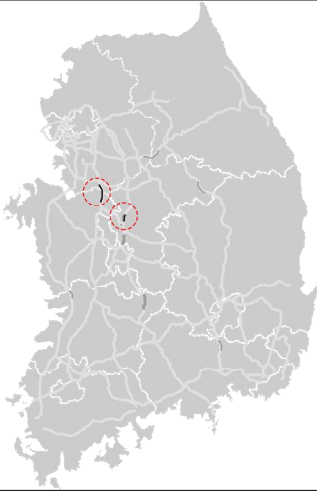
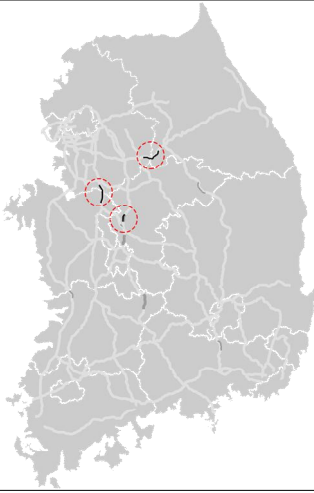
예산 (억원)	도로공사 산정식	개별편익	교통량 변화량	v/c 변화량	통행시간 변화량	최대편익 (GA)
1	1.39	2.17	2.24	2.08	2.08	2.49
1.5	2.55	2.84	3.61	3.06	3.06	3.81
2	2.92	4.19	4.56	4.52	4.51	4.89
2.5	3.64	5.15	6.03	6.03	6.03	6.15
3	5.07	6.61	6.56	6.56	7.15	7.15
3.5	6.44	7.65	7.53	7.65	7.65	7.65
평균	3.67	4.77	5.09	4.98	5.08	5.35
최대편익 대비 비율(%)	68.50	89.05	95.04	93.07	94.86	100.00



[그림 V-3] 예산별 분석결과

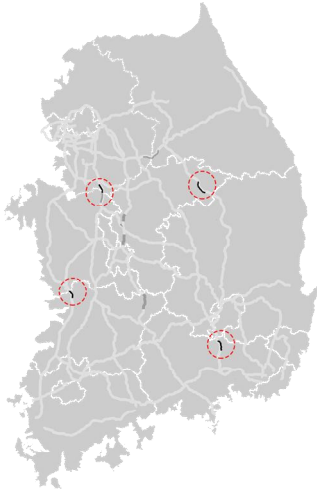
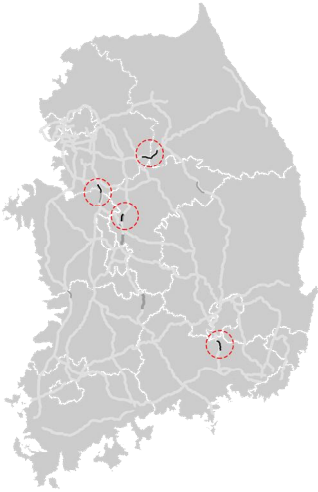
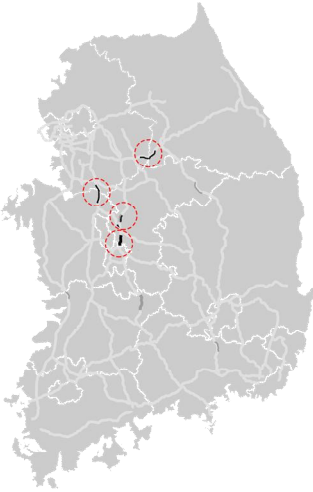
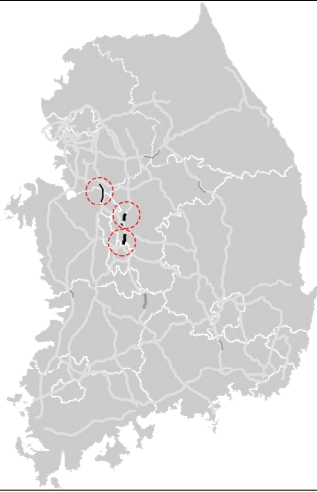
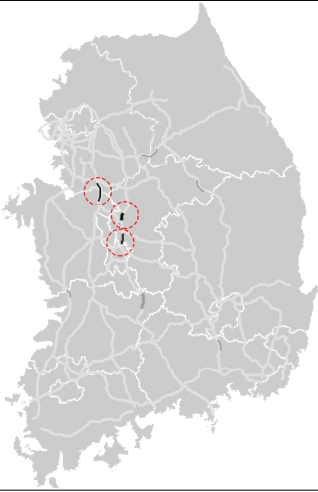
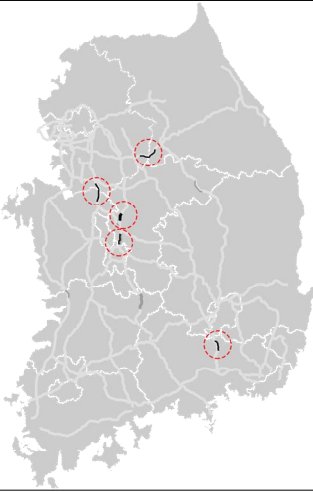
5.3.1. 예산별 분석(1억 원)

예산 제약 1억 원에 대한 대안선정 결과 편익이 가장 높은 링크 5의 영향으로 도로공사 산정식 외의 항목에서 편익이 높게 나타났으며, 지표별 우선순위 대안은 2순위인 링크 4가 포함되었다.

도로공사 산정식		개별편익		교통량	
					
선정사업	편익	선정사업	편익	선정사업	편익
⑥, ⑧, ⑫	1.39	⑤, ⑩, ⑭	2.17	①, ③, ④, ⑤	2.24
v/c		통행시간		최대편익(GA)	
					
선정사업	편익	선정사업	편익	선정사업	편익
④, ⑤, ⑩	2.08	④, ⑤, ⑩	2.08	④, ⑤, ⑪, ⑭	2.49

5.3.2. 예산별 분석(2억 원)

2억 원 내에서의 대안선정 결과 상호관계를 고려한 지표별 변화량 우선순위 대안들이 인접한 대상사업으로 선정이 되며, 최대 편익에 근접한 대안을 선정할 수 있음을 확인하였다.

도로공사 산정식		개별편익		교통량	
					
선정사업	편익	선정사업	편익	선정사업	편익
⑤, ⑥, ⑫, ⑬	2.92	⑤, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭	4.19	①, ②, ③, ④, ⑤, ⑨, ⑩, ⑭	4.56
v/c		통행시간		최대편익(GA)	
					
선정사업	편익	선정사업	편익	선정사업	편익
①, ②, ③, ④, ⑤, ⑨, ⑩, ⑪	4.52	①, ④, ⑤, ⑨, ⑩, ⑪, ⑫	4.51	③, ④, ⑤, ⑨, ⑩, ⑪, ⑬, ⑭	4.89

5.4. 분석결과

실제 전국권 네트워크를 이용하여 실제 data를 반영하여 Toy Network에서 수행하였던 분석방안들에 대하여 확장된 네트워크에서의 분석을 수행하였다.

각 항목별 우선순위 방안의 선정 대안과 GA를 이용한 최대편익 대안의 예산별 분석결과 최대 편익에 대비 각 항목별 우선순위 분석 결과는 평균 68.5~95.04% 수준으로 나타났다.

Toy Network에 비해 대상사업의 수가 증가하였고 우선순위 선정에 실제 data를 이용하여 각 항목별 우선순위의 차이가 크게 나타나 선정 대안의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

우선순위 선정시 편익을 고려치 않은 도로공사 산정식 방안을 제외하고 개별편익과 지표별 변화량에 따른 우선순위 방안으로 구분하여 보면, 개별편익 방안에 비해 지표별 변화량 방안은 상호관계의 영향으로 인접 혹은 영향을 크게 미치는 링크들이 대상사업으로 선정되고 선정대안의 편익이 높은 것을 확인하였다.

유전자 알고리즘을 통한 최대편익 분석의 경우 가장 높은 편익의 대안을 선정할 수 있는 장점이 있으나 우선순위 방안에 비해 분석시간이 길다는 단점을 가지고 있다.

따라서 물리적 상황에 맞는 대안 선정방안을 이용하여 제한된 예산 내에서의 네트워크의 편익을 최대화 할 수 있는 대안을 선정하는 것이 필요하다.

6. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 유지보수 대상 사업간의 관계를 고려한 네트워크 최대 편익 대안 선정에 대하여 연구를 진행하였다.

제한된 예산 내에서의 유지보수 최적화를 위하여 링크 상호간의 관계를 고려한 네트워크 총 편익 최대화 대안을 선정하여 네트워크 측면에서의 유지보수 최적화와 경제성 분석을 통한 합리적 방안을 모색하였다.

고속도로와 국도의 속성을 반영한 Toy Network를 통하여 대안별 편익 분석을 통하여 상호관계에 대한 검증을 하고 이를 통해 개별 사업 분석이 아닌 네트워크 측면에서의 분석으로 경제적 타당성을 높일 수 있음을 확인하였다.

한국도로공사의 산정식을 통한 우선순위 방안과 개별 사업 편익 우선순위 방안에 대한 예산별 분석을 통해 편익 우선순위 산정으로 편익 증대 방안을 모색하였다.

상호관계로 인해 도출되는 정량적 지표인 교통량, v/c , 통행시간 변화량과 편익과의 상관관계 분석을 통해 편익과의 관계를 확인하고 이들 지표를 이용하여 상호관계를 반영한 대안 선정을 수행하였다.

네트워크 최대편익 대안 선정으로 링크간 상호관계가 존재하고 그 효과로 인해 최대 편익의 대안이 달라지는 것을 확인하였으며, 상세 분석을 통해 대상사업별 편익의 차이가 크지 않을 경우 상호관계의 영향이 증가하여 우선순위 방법과의 차이가 증가할 것으로 예상된다.

네트워크 확장 등의 복잡도 문제 발생으로 인해 대안 선정에 유전자 알고리즘을 적용하여 각 예산별 전역해와 유전자 알고리즘 방안 선정 대안과의 비교결과 전역해에 근접하는 것을 검증하였다.

Toy Network에서 규명된 사항에 대하여 실제 조사된 data를 이용한 전국 고속도로 네트워크에서 분석을 수행하였다.

각 항목별 우선순위 방안의 선정 대안과 유전자 알고리즘을 이용한 최대편익 대안의 예산별 분석결과 Toy Network에 비해 대상사업의 수

가 증가하였고 우선순위 선정에 실제 data를 이용하여 각 항목별 우선순위의 차이가 크게 나타나 최대 편익에 대비 각 항목별 우선순위 분석 결과는 평균 68.5~95.04% 수준으로 나타났다.

예산별 대안선정 결과 개별편익 방안에 비해 지표별 변화량 방안은 상호관계의 영향으로 인접 혹은 영향을 크게 미치는 링크들이 대상사업으로 선정되고 선정대안의 편익이 높은 것을 확인하였다.

유전자 알고리즘을 통한 최대편익 분석의 경우 가장 높은 편익의 대안을 선정할 수 있는 장점이 있으나 우선순위 방안에 비해 분석시간이 길어 물리적 상황에 맞는 대안 선정방안을 이용하여 제한된 예산 내에서의 네트워크의 편익을 최대화 할 수 있는 대안을 선정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 각 항목별 우선순위 방안을 선정하고 그에 따른 대안 선정을 수행하였는데 합리성을 높이기 위하여 우선순위 지표들을 통합하여 최대 편익에 근접할 수 있는 통합지표에 관련된 연구가 필요할 것으로 생각된다.

또한, 대안 선정을 위해 경제적 측면에서 네트워크 총 편익의 최대화를 목표로 대안을 선정하는 방안에 대하여 연구를 진행하였으나 환경적 요인, 안전 관련 사항 등의 목적에 따른 연구가 수반될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 경기개발연구원. (2014). 경기도 도로포장관리시스템의 구축방향.
2. 국토교통부. (2016). 2016 국토교통 통계연보.
3. 국토교통부. (2012). 도로설계편람.
4. 국토교통부. (2013). 도로 포장 유지보수 실무편람.
5. 인천발전연구원. (2012). 인천시 도로포장관리시스템(PMS)의 구축방안
6. 한국개발연구원. (2008). 도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준 지침 수정·보완 연구(제5판).
7. 한국건설기술연구원. (2016). 2015 도로포장관리시스템.
8. 한국건설기술연구원. (2016). 장수명 도로포장 활성화 방안 연구.
9. 한국도로공사. (2013). 고속도로 유지관리 서비스 등급 연구.
10. 한국도로공사. (2013). 고속도로 포장의 장기공용성 관측구간을 활용한 포장공용성 변화 분석.
11. 한국도로공사. (2013). 장수명 포장을 위한 고속도로 포장관리 로드맵
12. 한국도로공사. (2012). 포장 관리 및 유지보수 실무 편람.
13. 박수영 (2011). 유전자 알고리즘을 이용한 실내 보행자최적 대피모형, 석사학위논문.
14. 김정민, 최승현, 도명식, & 한대석. (2016). 장래교통수요예측을 고려한 도로 유지관리 방안. 한국도로학회논문집, 18(3): 47-57.
15. 김중효 (2009). 유전자 알고리즘과 신경망 이론의 결합에 의한 신호 교차로 위험도 예측모형 개발에 관한 연구, 석사학위논문.
16. 도명식, 권수안, & 백봉기. (2010). 효율적 도로관리를 위한 의사결정 지원시스템 개발의 필요성. 한국도로학회지, 12(4): 23-31.
17. 도명식, 권수안, 이상혁, & 김용주. (2014). 국도 포장관리를 위한 의사결정시스템 개발. 대한토목학회논문집, 34(2): 645-654.
18. 박종범, 2013, 효율적인 고속도로 포장 유지관리를 위한 업무 프로세스 개선에 관한 연구. 석사학위 논문, 충남대학교.

19. 서호덕. (2007). 도로면 상태 및 차량의 주행속도에 따른 공용성 분석 기법 개발. 석사학위 논문, 연세대학교.
20. 신성필 & 양인철 (2013). 도로유지보수 및 방재 사업의 우선순위 결정에 관한 연구. 대한토목학회 학술대회: 377-380.
21. 이석범 (2002). 생애주기비용을 고려한 도로포장 보수공법 경제성분석 방안. 석사학위 논문, 중앙대학교.
22. 이용준, 도명식, & 이상혁. (2013). 장래교통수요를 고려한 도로유지 보수전략 수립 연구. 한국도로학회 학술발표회 논문집: 149-152.
23. 임광수. (2012). 도로 유지보수 경제성 분석을 위한 비용 산출에 관한 연구. 석사학위 논문, 중앙대학교.
24. 장동복. (2017). 차종별 고속도로 손상도와 유지보수비용의 관계분석. 석사학위 논문, 명지대학교.
25. 전종서. (2010). 도로포장의 환경비용을 고려한 생애주기비용 산정에 관한 연구. 석사학위 논문, 연세대학교.
26. 최승현. (2014). 한국형 포장관리시스템을 활용한 국도포장 유지보수 공법의 경제성 분석. 석사학위 논문, 한밭대학교.
27. 한대석, 도명식, 김정환, 양효선. (2008). 효율적 PMS운영을 위한 예산최적화와 유지보수기준. 대한토목학회, 2008 대한토목학회 정기학술대회, pp. 461-464.
28. 한상준. (2010). 편익 정량화를 통한 고속도로 유지보수 우선순위 선정, 석사학위 논문, 명지대학교.
29. Durango-Cohen, P. (2007). A time series analysis framework for transportation infrastructure management, Transportation Research Part B: Methodological, 41(5), pp. 493 - 505.
30. Durango-Cohen, P. L. and P. Sarutipand (2007). Capturing interdependencies and heterogeneity in the management of multifacility transportation infrastructure systems. Journal of infrastructure systems 13(2): 115-123.

31. Durango-Cohen, P. L. and P. Sarutipand (2009). Maintenance optimization for transportation systems with demand responsiveness. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 17(4): 337-348.
32. Kobayashi, K., Ejiri, R. and Do, M. (2008). Pavement Management Accounting System. *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.14, pp. 159-168.
33. Kuhn, K. D. (2009). Network-level infrastructure management using approximate dynamic programming. *Journal of infrastructure systems* 16(2): 103-111.
34. Medury, A. (2013). *Incorporating Network Considerations into System-level Pavement Management Systems*. University of California, Berkeley.
35. Medury, A. and S. Madanat (2013). Incorporating network considerations into pavement management systems: A case for approximate dynamic programming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 33: 134-150.
36. Medury, A. and S. Madanat (2013). Simultaneous network optimization approach for pavement management systems. *Journal of infrastructure systems* 20(3): 04014010.
37. Ouyang, Y. and Madanat, S. (2004). Optimal scheduling of rehabilitation activities for multiple pavement facilities: exact and approximate solutions, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(5), pp. 347 - 365.
38. Ouyang, Y. (2007). Pavement resurfacing planning for highway networks: parametric policy iteration approach, *ASCE Journal of Infrastructure Systems*, 13(1), pp. 65 - 71.
39. Panda, B. (2013). *A Cost-Benefit Optimization Model For*

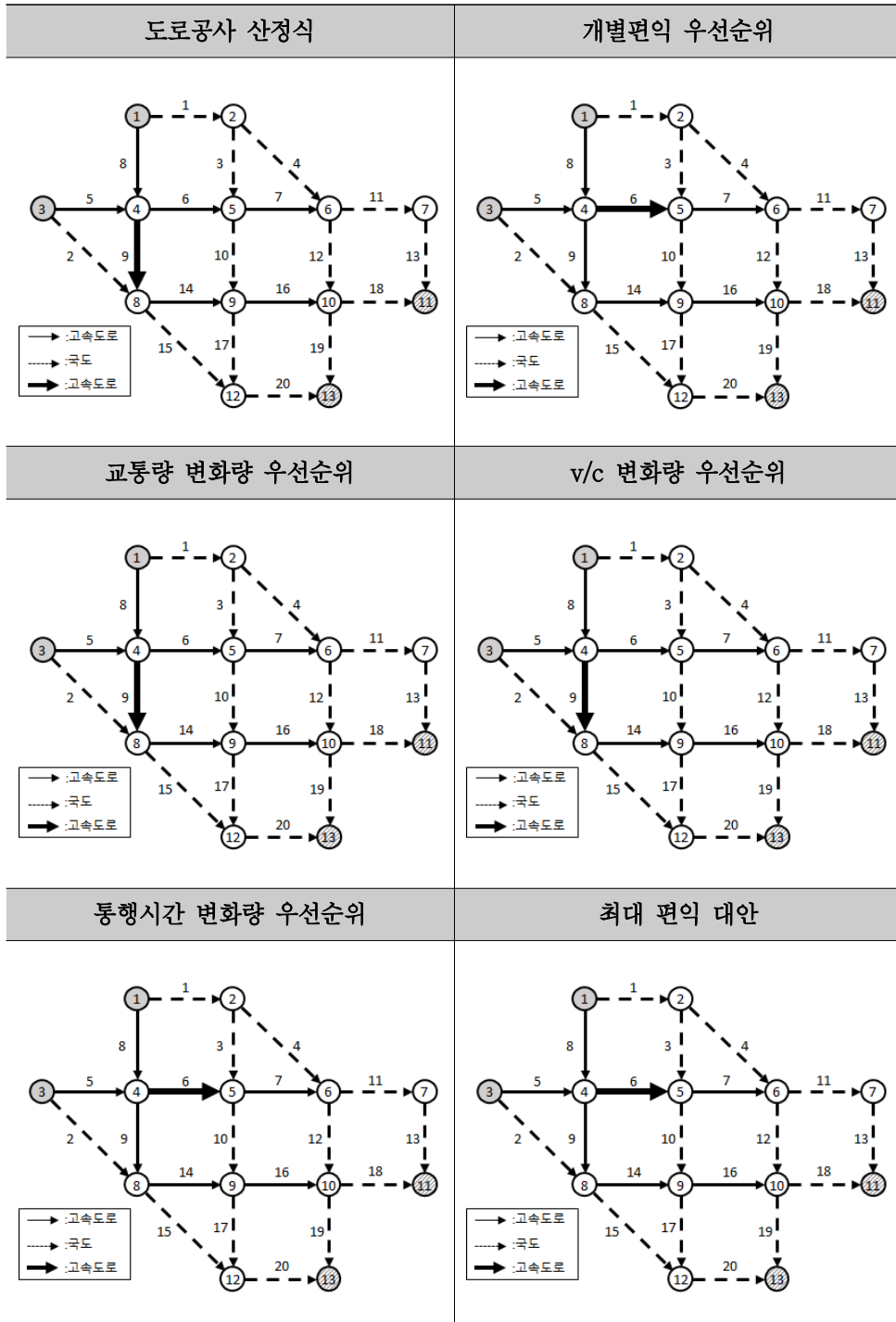
Maintenance and Rehabilitation Activities of Roads. National Institute of Technology, Rourkela.

40. Sarutipand, P. (2008). An Optimization Framework for Management of Transportation Infrastructure Systems with Interdependet Facilities. Doctoral Dissertation, Northwestern University.
41. Uchida, K. and Kagaya, S. (2006). Development of life-cycle cost evaluation model for pavements considering drivers route choices. Transportation Research Record, 1985, pp. 115 - 124.

부 록

A. 예산별 Toy Network 분석결과

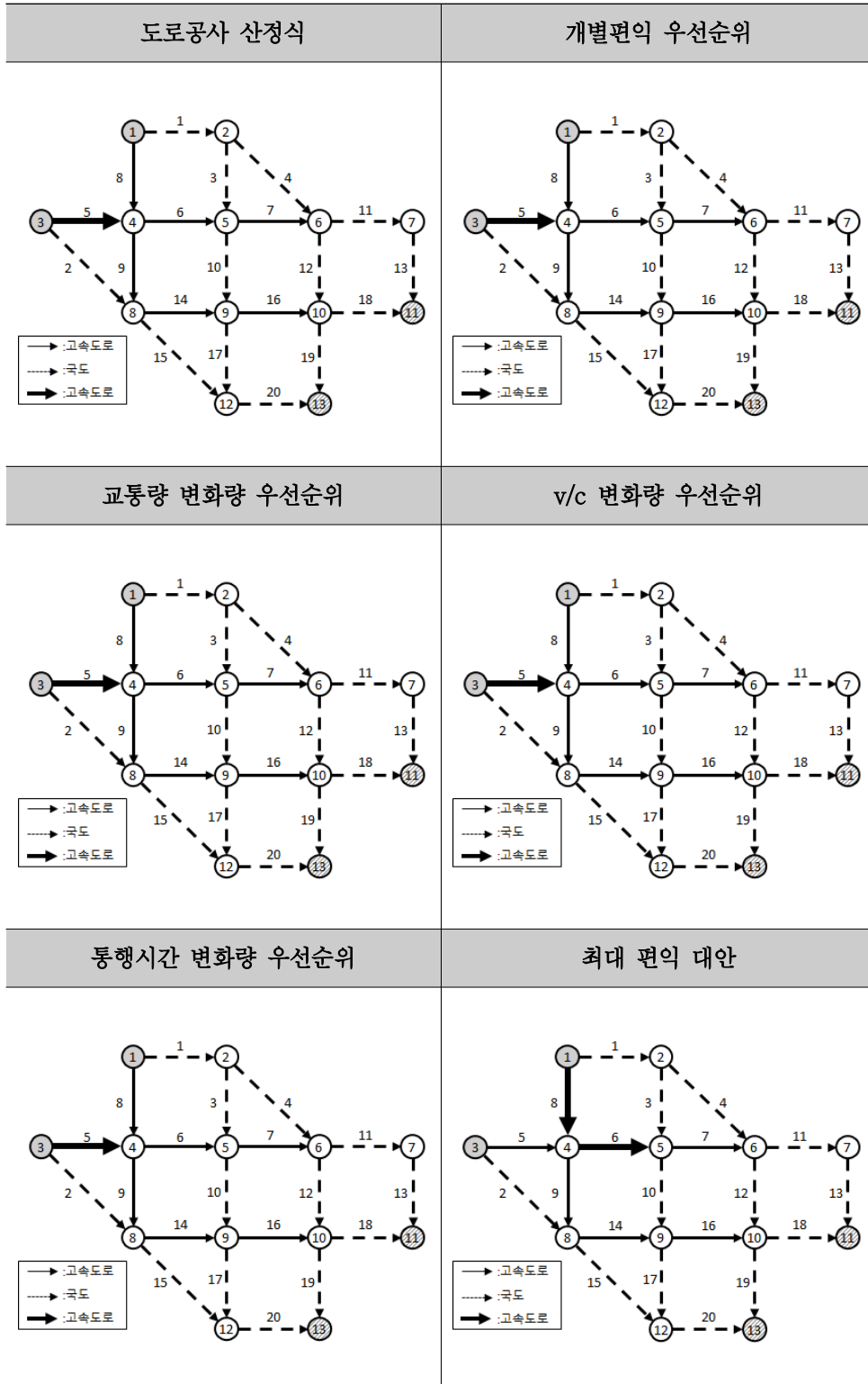
□ 예산 20억



□ 예산 30억

도로공사 산정식	개별편익 우선순위
교통량 변화량 우선순위	v/c 변화량 우선순위
통행시간 변화량 우선순위	최대 편익 대안

□ 예산 40억



□ 예산 50억

도로공사 산정식	개별편익 우선순위
교통량 변화량 우선순위	v/c 변화량 우선순위
통행시간 변화량 우선순위	최대 편익 대안

□ 예산 60억

도로공사 산정식	개별편익 우선순위
교통량 변화량 우선순위	v/c 변화량 우선순위
통행시간 변화량 우선순위	최대 편익 대안

□ 예산 70억

도로공사 산정식	개별편익 우선순위
교통량 변화량 우선순위	v/c 변화량 우선순위
통행시간 변화량 우선순위	최대 편익 대안

□ 예산 80억

도로공사 산정식	개별편익 우선순위
교통량 변화량 우선순위	v/c 변화량 우선순위
통행시간 변화량 우선순위	최대 편익 대안

□ 예산 90억

도로공사 산정식	개별편익 우선순위
교통량 변화량 우선순위	v/c 변화량 우선순위
통행시간 변화량 우선순위	최대 편익 대안

□ 예산 100억

도로공사 산정식	개별편익 우선순위
교통량 변화량 우선순위	v/c 변화량 우선순위
통행시간 변화량 우선순위	최대 편익 대안

Abstract

An Optimization of Highway Management Considering Network Effect between Links

Min, Keun Hong

Department of Civil and Environmental Engineering

The Graduate School

Seoul National University

The decrepit repair demand of Korean highway management is increasing along with its necessary budget, while the allocated budget relating to necessary budget is decreasing. Accordingly, it is important to select most beneficial management project which assures economic feasibility within limited budget. Also, it is necessary to maximize network total benefit through network analysis considering link corelationship. The purpose of this thesis is the optimization of highway maintenance using network considering the corelation of each project plan and the selection of project providing maximum benefit through economic analysis within limited budget.

This study is conducted by comparing benefits of the selected alternatives in each budget using the Korea Expressway Corporation calculating formula, individual benefit suggested from this study, prioritization in accordance with variation by index, and optimization of network total benefit. With respect to network analysis considering link corelation , it is possible to calculate the maximum benefit in limited budget, however; when the number of project plans increase the complexity becomes high, therefore genetic algorithm was applied in the study.

The results indicates that in contrast to individual benefit, variation by index, due to its interrelationship, selects project plans in which links are adjacent or effective and the selected alternatives shows high benefit. Maximum benefit analysis through genetic algorithm reveals an advantage of choosing the alternatives against maximum benefit, yet this method requires longer analysis time than prioritization, it is desirable to set a practical approach according to the situation.

By providing prioritization of index and optimization of network total benefit, using nationwide highway network analysis. it is expected that this study will support for selecting highway management project in the future.

keywords : highway management, highway pavement, project priority, maximization of benefit, genetic algorithm

Student Number : 2008-21026